

DOI: 10.13245/j.hust.181216

水下滑翔蛇形机器人结构与动力学建模

唐敬阁^{1,2,3} 李斌^{1,2} 常健^{1,2} 王聪^{1,2}

(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 中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 辽宁 沈阳 110016;

3 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 为了研制一种新型的具有高续航力和高机动性的水下滑翔蛇形机器人, 提出一种适应其细长体外形、多模块特点的运动调节机构. 基于动量定理、动量矩定理以及递推牛顿-欧拉法, 分别建立滑翔运动和蛇形游动的动力学模型, 模型充分考虑了附加质量力、流体力和流体力矩等影响因素. 最后对建立的模型进行闭环控制仿真分析, 结果证明了机械系统的有效性以及动力学模型的有效性.

关键词 水下滑翔蛇形机器人; 动力学模型; 滑翔运动; 蛇形游动; 步态

中图分类号 TP242.3 **文献标志码** A **文章编号** 1671-4512(2018)12-089-06

Design and dynamic model of underwater gliding snake-like robot

Tang Jingge^{1,2,3} Li Bin^{1,2} Chang Jian^{1,2} Wang Cong^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2 Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

3 University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In order to develop a new type of underwater gliding snake-like robot with high endurance and high maneuverability, a movement adjustment mechanism that adapts to its slender body shape and multi-module characteristics was proposed. Then, based on momentum theorem, moment of momentum theorem and recursive Newton-Euler method, the dynamic models of gliding motion and serpentine swimming were established respectively. Moreover, added mass, fluid force and torque were fully considered. Finally, the closed-loop control simulations of the models were performed. The results demonstrate the effectiveness of the mechanical system and the dynamic models.

Key words underwater gliding snake-like robot; dynamics model; gliding motion; serpentine swimming; gait

为了满足监测水质、海藻爆发污染、原油泄漏等水环境监控任务, 水下机器人^[1-2]须要具有较好的续航能力从而能够进行长时间的水中操作, 并且须要具有较高的机动性以适应复杂的水下环境. 水下滑翔蛇形机器人(UGSR)结合了水下滑翔机(UG)^[3]和水下蛇形机器人(USR)^[4]的特点, 通过调节净浮力和重心浮心之间的相对位置实现滑翔运动, 通过控制相邻关节之间的偏转实现多种蛇形游动, 体现了强续航能力和高机动性, 在上述水下任务中具有较

好的应用前景.

传统UG的滑翔运动是通过油囊或水泵实现重力的调节, 通过轴线的滑动质量块实现俯仰力矩的调节. 考虑到UGSR具有蛇的外形、细长体、模块化的特点, 机体内部空间狭小, 不适合采用UG的调节方法. 基于已有的USR研究平台^[5], 本研究进行了机械结构的设计, 提出了一种通过调节关节长度同时实现净浮力调节和俯仰调节的伸缩关节模块. 该关节具有三个自由度: 一个伸缩自由度用于

收稿日期 2018-05-25.

作者简介 唐敬阁(1991-), 女, 博士研究生; 常健(通信作者), 副研究员, E-mail: changjian@sia.cn.

基金项目 国家重点研发计划资助项目(2017YFB1300101).

改变关节模块的长度,从而调节浮力;两个俯仰-偏航自由度,与其他二自由度模块^[5]联合作用,用于实现蛇形游动步态,如平面蜿蜒运动、侧向运动以及三维翻滚运动等.将该三自由度关节安置于机器人首尾两端,当驱动关节沿轴向移动时,改变重心、浮心之间的相对位置,实现俯仰力矩的调节.

本研究提出的水下滑翔蛇形机器人由 2 个三自由度关节和 6 个二自由度关节组成,为了对该新型机器人进行运动分析,须要对机器人建立动力学模型.滑翔运动是一种净浮力驱动的运动方式,多步态蛇形游动是一种生物启发的运动方式,为了便于分析,对两种不同机理的运动分别进行动力学建模.对于 UG,动力学建模方法有基于潜艇、无人水下航行器和 UG 的六自由度模型^[6-8],其中应用较多的是文献[8]建立的一种非线性动力学模型;但是 UGSR 是通过伸缩关节来实现运动的,也没有 UG 的可移动质量块.对于 USR,建模方式可参考水下鳗鱼机器人^[9-11],其中递推的牛顿-欧拉法适用于串联多刚体系统,运算效率高;但是 UGSR 有一对机翼,为提高模型精确度,须要考虑机翼水动力特性的影响.

针对提出的 UGSR,本研究分别基于文献[8]中的动量-动量矩定理及文献[10]中的递推牛顿-欧拉方法,来推导这种新型机器人的滑翔运动模型和多步态蛇形游动模型,并且作如下假设:**a.**当机器人进行滑翔运动时,转动关节不发生相对转动;**b.**当机器人进行多步态游动时,伸缩关节不发生变化;**c.**流体是不可压缩、无旋、远场静止的理想流体.

1 滑翔运动动力学建模

UGSR 采用伸缩机构,通过改变浮力和俯仰力矩实现滑翔运动.在此采用动量-动量矩定理,对滑翔运动进行运动学和动力学建模.

1.1 三维模型

图 1 为系统的坐标系示意图, $Oxyz$ 为世界坐标系,水平向右为 x 轴正方向,垂直向下为 z 轴正方向.体坐标系 $O_b x_b y_b z_b$ 位于中性初始状态时机器人的几何中心,速度坐标系 $O_v x_v y_v z_v$ 的原点与体坐标系的原点重合.水平方向与机器人轴向 $O_b x_b$ 的夹角为俯仰角 θ ,速度方向 $O_v x_v$ 和 $O_b x_b$ 的夹角为攻角 α .体坐标系到世界坐标系的旋转矩阵为 R ,速度坐标系到体坐标系的旋转矩阵为 ${}^b R_v$.

关节的质量分布如图 2 所示.头部伸缩关节和

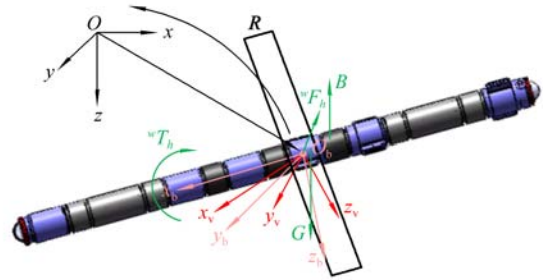


图 1 坐标系定义

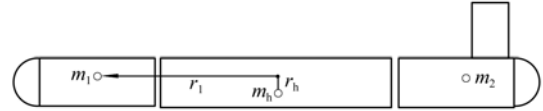


图 2 质量分布

头部模块质量用 m_1 表示,尾部伸缩关节和尾部模块质量用 m_2 表示,质心在体坐标系中分别表示为 r_1 和 r_2 ;中间部分的俯仰-偏航模块总质量为 m_s ,模块数量可按需要添加或减少,因为质心与体坐标系原点重合,所以蛇形游动部分的质心在体坐标系中的位置为 $r_s = 0$;为了使机器人在波动下具有自回复能力,通常要求重心低于浮心位置,质量 m_h 实现了该要求,可通过配重来实现,在体坐标系中的位置用 r_h 表示,则机器人的总质量为

$$m_{sum} = m_1 + m_2 + m_s + m_h.$$

机器人浸没在水中,取代的水的质量为 m ,浮心在体坐标系中的位置为 r_b .净浮力为重力减去浮力,即 $m_0 = m_{sum} - m$.

机器人在世界坐标系中的位置为 b ,绝对运动速度和角速度在体坐标系中的分别表示为 $V = [v_1, v_2, v_3]^T$, $\Omega = [\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3]^T$.对向量 $A = [a_1, a_2, a_3]^T$, $B = [b_1, b_2, b_3]^T$,定义算子 \wedge 使 $\hat{A}B = A \times B$.由以上符号表示方法,UGSR 的运动学方程为:

$$\dot{b} = RV; \tag{1}$$

$$\dot{R} = R\hat{\Omega}. \tag{2}$$

本节采用左上标 O 表示世界坐标系,UGSR 的动量和角动量在世界坐标系中分别表示为 ${}^O M^O V$, ${}^O J^O \Omega$,其中: ${}^O M$ 为世界坐标系中机器人的质量矩阵, ${}^O J$ 为世界坐标系中机器人的转动惯量, ${}^O V$ 和 ${}^O \Omega$ 分别为世界坐标系中的 V 和 Ω .利用动量定理和动量矩定理,可得

$$\sum {}^O f = \frac{d({}^O M^O V)}{dt}; \tag{3}$$

$$\sum {}^O x \times {}^O f + \sum {}^O T = \frac{d({}^O J^O \Omega)}{dt}, \tag{4}$$

式中: ${}^O f$ 为世界坐标系中作用在机器人上的外力; ${}^O x$ 为外力 ${}^O f$ 的作用位置; ${}^O T$ 为世界坐标系中作用在机器人上的外力矩.根据坐标系旋转矩阵,动量

和动量矩在体坐标系中和世界坐标系中的关系为

$${}^0M^0V = R(MV); \quad (5)$$

$${}^0J^0\Omega = R(J\Omega) + b \times (RMV), \quad (6)$$

式中: M 为固有质量和附加质量共同产生的惯性矩阵在体坐标系中的表示; J 为固有质量和附加质量共同作用产生的转动惯量在体坐标系中的表示. 结合式(1)~(6), 动量和角动量的微分为:

$$\dot{V} = M^{-1}((MV) \times \Omega + R^T \sum^s f); \quad (7)$$

$$\dot{\Omega} = J^{-1}(J\Omega \times \Omega + MV \times V + R^T(\sum({}^0x - b) \times {}^0f + \sum {}^0T)). \quad (8)$$

机器人受到的外力有静力学外力(重力和浮力)和动力学外力(水动力). 定义世界坐标系中 Oz 轴的单位方向向量为 $k = [0, 0, 1]^T$, 则机器人的总质量产生的重力为 $f_g = m_{\text{sum}}g(R^T k)$, 排水质量产生的浮力为 $f_b = -mg(R^T k)$. 机器人受到的外力矩有由于首尾关节的质量、配重的质量、排水质量的质心位置与体坐标系原点偏移产生的力矩 T_1, T_2, T_b , 以及流体作用力产生的力矩 T_h , 可表示为:

$$T_1 = m_1 g \hat{r}_1(R^T k); \quad T_2 = m_2 g \hat{r}_2(R^T k);$$

$$T_b = -mg \hat{r}_b(R^T k); \quad T_h = m_h g \hat{r}_h(R^T k).$$

由于机器人的外形和运动产生的水动力和水动力力矩定义在速度坐标系下, 分别表示为 vF_h 和 vT_h . 将力学分析结果带入式(7)和(8), 得到三维运动模型如下:

$$\dot{b} = RV;$$

$$\dot{R} = R\Omega;$$

$$\dot{V} = M^{-1}((MV) \times \Omega + m_0 g R^T k + {}^bR_v {}^vF_h);$$

$$\dot{\Omega} = J^{-1}[J\Omega \times \Omega + MV \times V +$$

$$m_1 g \hat{r}_1(R^T k) + m_2 g \hat{r}_2(R^T k) +$$

$$m_h g \hat{r}_h(R^T k) - mg \hat{r}_b(R^T k) + {}^bR_v {}^vT_h]. \quad (9)$$

1.2 水动力模型

由于流体黏性和非黏性的影响, 流体对在水中运动的物体产生流体力和力矩的作用. UGSR 受到的水动力作用在速度坐标系, 沿坐标轴进行投影可分为阻力、升力和侧滑力; 作用在 UGSR 的水动力力矩也在速度坐标系中表示. 根据飞机动力学^[12]中的定义, 水动力和水动力力矩在速度坐标系中的表示为

$${}^vF_h = [-D, F_S, -L]^T;$$

$${}^vT_h = [M_{\text{dl1}}, M_{\text{dl2}}, M_{\text{dl3}}]^T,$$

式中: D 为阻力; L 为升力; F_S 为侧滑力; $M_{\text{dl1}}, M_{\text{dl2}}, M_{\text{dl3}}$ 分别为对 $O_v X_v, O_v Y_v$ 和 $O_v Z_v$ 的力矩. 在垂直面运动时:

$$F_S = 0; \quad M_{\text{dl1}} = 0; \quad M_{\text{dl2}} = (K_{M0} + K_M \alpha)v^2; \quad M_{\text{dl3}} = 0;$$

$$D = (K_{D0} + K_D \alpha^2)v^2; \quad L = (K_{L0} + K_L \alpha)v^2,$$

式中: $v = \|V\|_2$; $K_{D0}, K_D, K_{L0}, K_L, K_{M0}$ 和 K_M 为水动力系数.

2 蛇形游动动力学建模

2.1 运动学模型

当 UGSR 在垂直面行波运动时, 不考虑伸缩关节模块的伸缩运动, 将其视为多模块串联的基座可移动机器人. 为了便于表示, 用 n 表示关节个数, $n+1$ 表示模块个数, 定义头部模块编号为 0, 以此类推, 则尾部模块编号为 n . 令关节坐标系 $\{i\}$ 固连于模块 i , 坐标系原点位于转动轴线与模块轴线的交点, z_i 轴为关节 i 的俯仰转动轴, x_i 轴为 z_{i-1} 和 z_i 的公法线. 坐标系 $\{i\}$ 到坐标系 $\{i-1\}$ 的齐次变换矩阵可表示为

$${}^{i-1}T_{a,i} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_i \\ \cos \alpha_i \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i & -d_i \sin \alpha_i \\ \sin \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \cos \theta_i & \cos \alpha_i & d_i \cos \alpha_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{i-1}R_i & {}^{i-1}P_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

式中: θ_i 为 x_{i-1} 到 x_i 绕 z_i 的夹角; α_i 为 z_{i-1} 到 z_i 绕 x_{i-1} 的夹角; α_i 为 z_{i-1} 到 z_i 沿 x_{i-1} 的距离; d_i 为 x_{i-1} 到 x_i 沿 z_i 的距离; ${}^{i-1}R_i$ 为坐标系 $\{i\}$ 到坐标系 $\{i-1\}$ 的旋转变换; ${}^{i-1}P_i$ 为坐标系 $\{i\}$ 到坐标系 $\{i-1\}$ 的平移变换. 头部坐标系到世界坐标系 $\{O\}$ 的旋转变换为 0T_0 .

通过以下迭代过程, 可得模块的笛卡尔速度和加速度,

$${}^i T_{i-1} = \begin{bmatrix} {}^i R_{i-1} & -{}^i R_{i-1} {}^{i-1} \hat{P}_i \\ 0 & {}^i R_{i-1} \end{bmatrix}; \quad (10)$$

$${}^i V_i = {}^i T_{i-1} {}^{i-1} V_{i-1} + \dot{q}_i {}^i K_i; \quad (11)$$

$$\gamma_i = \begin{bmatrix} {}^i R_{i-1} ({}^{i-1} \omega_{i-1} \times ({}^{i-1} \omega_{i-1} \times {}^{i-1} P_i)) \\ {}^i \omega_{i-1} \times \dot{q}_i {}^i k_i \end{bmatrix} + \ddot{q}_i {}^i K_i; \quad (12)$$

$${}^i \dot{V}_i = {}^i T_{i-1} {}^{i-1} \dot{V}_{i-1} + {}^i \gamma_i; \quad (13)$$

$${}^i F_i = {}^i J_i {}^i \dot{V}_i + \begin{bmatrix} {}^i \omega_i \times ({}^i \omega_i \times {}^i M S_i) \\ {}^i \omega_i \times ({}^i J_{J_i} {}^i \omega_i) \end{bmatrix}, \quad (14)$$

式中: ${}^i T_{i-1}$ (6×6) 为坐标系 $\{i-1\}$ 到坐标系 $\{i\}$ 的齐次变换矩阵; ${}^i V_i = [{}^i v_i, {}^i \omega_i]^T$ (6×1) 为模块 i 的速度向量; ${}^i v_i$ 为坐标系 $\{i\}$ 的线速度; ${}^i \omega_i$ 为模块 i 的角速度; q_i 为关节角; ${}^i K_i = [0_{3 \times 3}, {}^i k_i]^T$ 为坐标系转动轴

的单位向量, 沿 z 轴的单位向量 ${}^i k_i = [0, 0, 1]^T$; ${}^i F_i = [{}^i F_{s,i}^T, {}^i N_{s,i}^T]^T$ 为模块 i 的所有外力和外力矩, 其中 ${}^i F_{s,i}^T$ 为作用在模块 i 上的所有外力, ${}^i N_{s,i}^T$ 为作用在模块 i 上的所有外力矩; ${}^i J_i = \begin{bmatrix} {}^i M_i & -{}^i M_i \hat{S}_i \\ {}^i M_i \hat{S}_i & {}^i J_{ji} \end{bmatrix}$ 为模块 i 的惯性矩阵, 包括了模块 i 的质量矩阵 ${}^i M_i$ 、关于坐标系 $\{i\}$ 的转动惯量矩阵 ${}^i J_{ji}$ 以及相对于坐标系 $\{i\}$ 的一阶惯量 ${}^i M_i \hat{S}_i$, 其中 S_i 为模块 i 的质心在坐标系 $\{i\}$ 中的位置向量.

2.2 动力学模型

图 3 所示为模块 i 的受力分析图(图中 g_i 为模块 i 的重心), 根据模块的力平衡条件可得

$${}^i f_i = {}^i F_i + {}^{i+1} T_i^T {}^{i+1} f_{i+1} + {}^i f_{ei},$$

式中: ${}^i f_i = [f_{s,i}^T, n_{s,i}^T]^T$ 为模块 $i-1$ 作用在模块 i 上的所有外力和外力矩; ${}^{i+1} f_{i+1}$ 为模块 i 作用在模块 $i+1$ 上的所有外力和外力矩; ${}^i f_{ei} = [f_{ei}^T, n_{ei}^T]^T$ 为模块 i 受到的环境外力和外力矩.

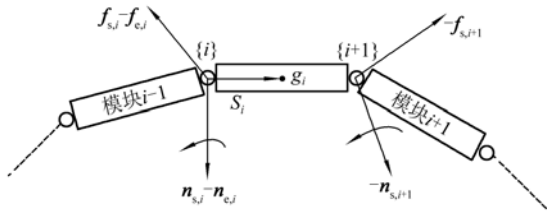


图 3 作用在模块 i 上的力和力矩

递推牛顿-欧拉方法包括三个过程如下

a. 正向迭代过程: 从头部关节到尾部关节, 利用式(10)~(14)计算坐标旋转矩阵和各模块的速度、加速度、外力, 并规定

$${}^i \beta_i = \begin{bmatrix} {}^i \omega_i \times ({}^i \omega_i \times {}^i M S_i) \\ {}^i \omega_i \times ({}^i J_{ji} {}^i \omega_i) \end{bmatrix} + {}^i f_{ei}.$$

b. 后向迭代过程: 从尾部关节到头部关节, 计算头部加速度. 首先, 对 J_n^* 和 β_n^* 进行初始化:

$$J_n^* = J_n; \beta_n^* = \beta_n.$$

然后按照以下规律从尾部到头部, 依次迭代:

$${}^i J_i^* = {}^i J_i + {}^{i+1} T_i^T {}^{i+1} J_{i+1}^* {}^i T_i;$$

$${}^i \beta_i^* = {}^i \beta_i + {}^{i+1} T_i^T {}^{i+1} \beta_{i+1}^* + {}^{i+1} T_i^T {}^{i+1} J_{i+1}^* {}^i \gamma_{i+1},$$

则头部加速度为

$${}^0 \dot{V}_0 = -({}^0 J_0^*)^{-1} {}^0 \beta_0^*.$$

c. 正向迭代过程: 获得头部加速度之后, 从头部到尾部, 采用以下等式计算各模块的加速度及关节力矩:

$${}^i \dot{V}_i = {}^i T_{i-1} {}^{i-1} \dot{V}_{i-1} + {}^i \gamma_i;$$

$${}^i f_i = [f_{s,i}^T, n_{s,i}^T]^T = {}^i J_i^* {}^i \dot{V}_i + {}^i \beta_i^*.$$

2.3 关节模块水动力分析

UGSR 在水中运动时受到流体静力和流体动力的影响, 因为在初始状态时机器人保持中性状态, 所以静力平衡. 机器人的各模块受到的水动力有附加质量力、阻力、阻力产生的力矩. 假设机器人的每个模块都是圆柱体, 定义其半径为 r , 长度为 l , 附加质量系数为 C_a , 沿运动切向和法向的阻力系数分别为 C_f 和 C_d , 则由机器人的外形和流体特性而产生的附加质量矩阵、附加转动惯量和阻力系数矩阵分别为:

$$M_A = \text{diag}[0, C_a \rho \pi r^2 l, C_a \rho \pi r^2 l];$$

$$J_A = \text{diag}[0, C_a \rho \pi r^2 l^3 / 12, C_a \rho \pi r^2 l^3 / 12];$$

$$C_D = \text{diag}[\rho \pi r l C_f / 2, \rho \pi r l C_d / 2, \rho \pi r l C_d / 2].$$

作用在模块上的附加质量力和附加质量力矩在质心坐标系中表示为

$$\begin{bmatrix} f_{sa,gi} \\ n_{sa,gi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_A & -M_A {}^i \hat{S}_i \\ M_A {}^i \hat{S}_i & J_A \end{bmatrix} \dot{V}_{gi} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ {}^i \hat{S}_i M_A ({}^i \hat{\omega}_i {}^i \hat{\omega}_i S_i) / 3 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

式中 V_{gi} 和 \dot{V}_{gi} 分别为模块质心的线速度和加速度, ${}^i S_i$ 为模块 i 的质心相对坐标系 $\{i\}$ 的位置. 用坐标系 $\{i\}$ 的速度和加速度表示,

$$V_{gi} = V_i + {}^i \omega_i \times {}^i S_i; \quad (16)$$

$$\dot{V}_{gi} = \dot{V}_i + {}^i \hat{\omega}_i \cdot {}^i \hat{\omega}_i \cdot {}^i S_i + {}^i \hat{\omega}_i \times {}^i S_i. \quad (17)$$

作用在模块上的流体阻力和产生的流体力矩为

$$\begin{bmatrix} f_{sd,i} \\ n_{sd,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_D (V_i + |V_i| V_i) \\ \lambda_2 \omega_i + \lambda_3 |\omega_i| \omega_i \end{bmatrix}, \quad (18)$$

式中 λ_2 和 λ_3 分别为线性、非线性阻力系数矩阵,

$$\lambda_2 = \text{diag}[0, 4C_d \rho r (l/2)^4 / 3, 4C_d \rho r (l/2)^4 / 3];$$

$$\lambda_3 = \text{diag}[0, C_d \rho r (l/2)^5, C_d \rho r (l/2)^5].$$

对于带有机翼的关节模块 i , 受到的外力和外力矩有: 模块 $i-1$ 和模块 $i+1$ 的约束力、式(15)~(18)描述的水动力以及流体对机翼的水动力. 图 4 为机翼关节模块 i 的水动力示意图, 垂直面上受到阻力 D 、升力 L 和流体力矩 M_{dl2} 的作用. $\{V\}$ 为该模块的质心速度坐标系, $\{g\}$ 为该模块的质心坐标系, 则 $\{V\}$ 到 $\{g\}$ 、 $\{g\}$ 到 $\{i\}$ 的 6×6 变换矩阵为:

$${}^g R_V = \begin{bmatrix} {}^g R_V & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & {}^g R_V \end{bmatrix}; \quad {}^i R_g = \begin{bmatrix} I_3 & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ {}^i \hat{S}_i & I \end{bmatrix}.$$

机翼受到的流体外力和流体力矩在 $\{V\}$ 中分别为:

$$f_{s,w} = [-D, L, 0]^T; \quad n_{s,w} = [0, 0, M_{dl2}]^T.$$

所以流体对机翼产生的水动力为

$${}^i f_{w,i} = {}^i R_g^g R_V f_w,$$

式中 $f_w = [f_{s,w}^T, n_{s,w}^T]^T$.

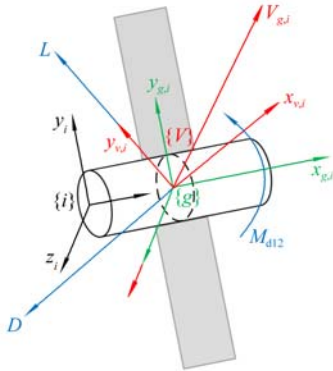


图 4 机翼模块 i 的水动力分析

3 动力学仿真与分析

根据以上推导的动力学模型, 对垂直平面的锯

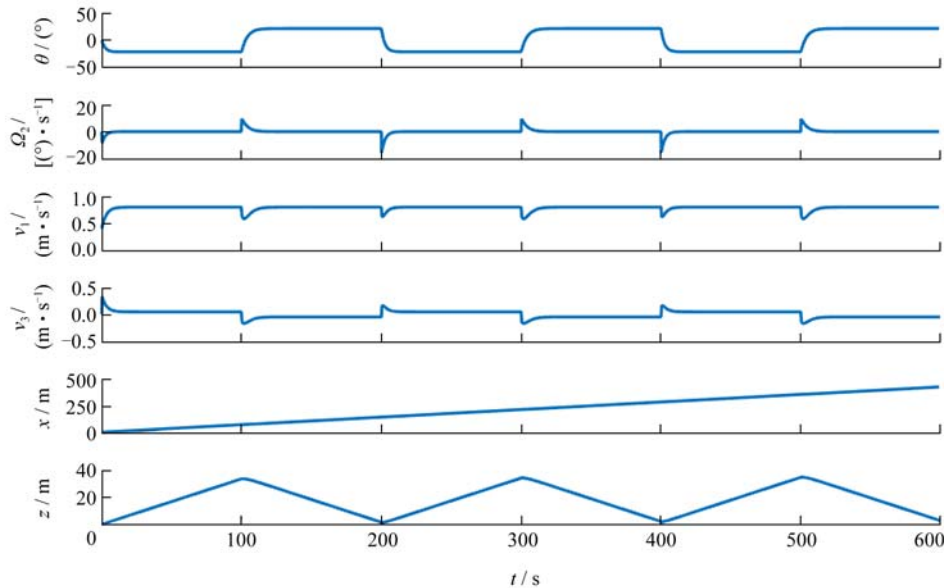


图 5 稳定滑翔运动各状态量

3.2 行波运动

UGSR 通过使相邻关节角以正弦规律改变, 并使相邻关节之间产生相位差来实现行波步态, 定义以下关节函数来控制关节 i 的转角,

$$\phi_i^* = -A \cos(\omega t + (i-1)\varphi) \quad (i=1, 2, \dots, n),$$

式中: A 为关节输入波的幅值; φ 为两个相邻关节之间的相位差; ω 为正弦曲线的角频率. 以 ϕ^* 为参考关节角, 采用 PD 控制器的反馈作为实际的关节输入角, 在 Matlab 中对 USR 和 UGSR 分别进行了运动仿真, 其中参数 $A=0.5, \omega=\pi, \varphi=0.45$. 图 6 为当 USR 和带有机翼的 UGSR 在垂直面进行行波运动时第五个关节受到的关节力矩, 结果显示: 当

齿滑翔运动和行波步态进行仿真. UGSR 的结构参数设置如下: 关节模块的长度为 0.15 m, 直径为 0.12 m, 固定质量 m_h 为 0.05 kg, 流体密度为 1 000 kg/m³. 滑翔运动的水动力系数为^[13]: $K_L=18.68, K_{L0}=0.062988, K_D=17.03, K_{D0}=0.45611, K_M=-0.9238, K_{M0}=0$. 蛇形游动时采用的水动力系数为^[14]: $C_a=1, C_f=0.03, C_d=2$.

3.1 滑翔运动

根据滑翔运动模型, 进行垂直面滑翔轨迹的仿真. 仿真初始值: $\theta=0^\circ, V=[0.4, 0, 0]^T, \Omega=0_{3 \times 1}$. 工作点选择: 下潜运动的滑翔角 $\theta-\alpha=-25^\circ$, 滑翔速度 $v=0.8$ m/s; 上浮运动的滑翔角 $\theta-\alpha=25^\circ$, 滑翔速度 $v=0.8$ m/s. 以期望的工作点为参考, 采用线性二次型调节器优化控制方法设计反馈控制律, 实现运动稳定. 各状态量(俯仰角 θ , 角速度 Ω_2 , 速度 v_1, v_3)随仿真时间收敛至期望的平衡点, 结果如图 5 所示.

UGSR 在机翼的作用下进行行波运动时, 关节输入力矩更小. 图 7 和图 8 对 USR 和 UGSR 的头部方向角、头部运动速度进行了对比分析. 由于机翼的

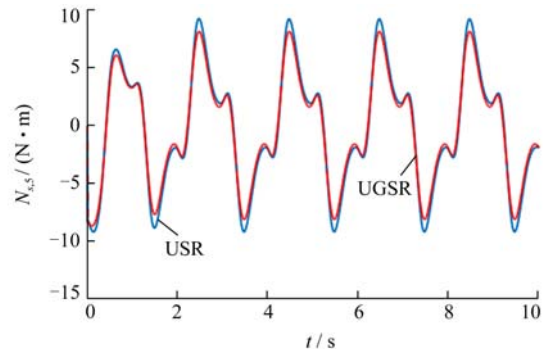


图 6 第五个关节受到的力矩

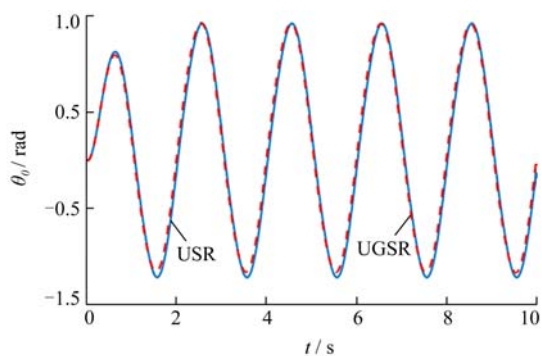


图 7 头部方向角

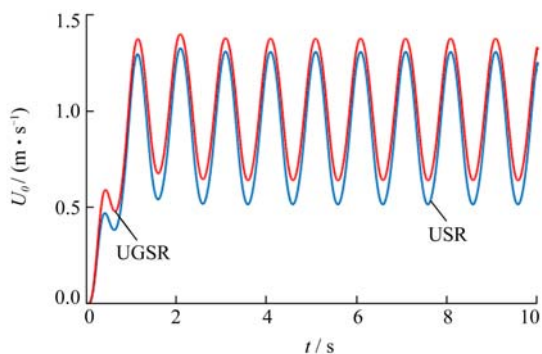


图 8 头部速度

升力和流体力矩作用, 因此 UGSR 稳定运动时的所需关节力矩小于 USR, 头部方向角大于 USR; 由于机翼阻力的作用, 增加了切向力, 因此 UGSR 的头部运动速度大于 USR 的。

4 结语

为了同时实现高续航滑翔运动和高机动游动步态, 基于对 UG 和 USR 的分析, 对 USR 进行了结构重新设计, 提出了由 2 个伸缩关节模块和 6 个转动关节模块组成的 UGSR. 分别采用动量-动量矩定理、递推牛顿-欧拉方法对两种驱动方式的运动进行了动力学建模, 并通过仿真进行了垂直平面的运动分析. 仿真结果显示: 提出的机械结构系统能够实现滑翔运动和蛇形游动, 验证了结构的合理性与可行性; 与传统的 USR 相比, 机翼的存在使行波步态的头部速度更大, 头部方向角更大, 输入力矩更小。

参 考 文 献

[1] Wu Z X, Yu J Z, Yuan J, et al. Analysis and verification of a miniature dolphin-like underwater glider[J]. *Industrial Robot: An International Journal*, 2016, 43(6): 628-635.
 [2] 李宗刚, 马伟俊, 葛立明, 等. 一种 2 自由度胸鳍推进仿生箱鲀机器鱼转弯特性研究[J]. *机器人*, 2016, 38(5): 593-602.
 [3] Rudnick D L, Davis R E, Sherman J T. Spray underwater

glider operations[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2016, 33(6): 1113-1122.
 [4] Pettersen K Y. Snake robots[J]. *Annual Reviews in Control*, 2017, 44: 19-44.
 [5] 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[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(9): 18-25.
 [6] Evans J, Nahon M. Dynamics modeling and performance evaluation of an autonomous underwater vehicle[J]. *Ocean Engineering*, 2004, 31(14/15): 1835-1858.
 [7] 顾建农, 李启杰, 高磊, 等. 水下滑翔机运动特性建模与仿真[J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2016, 44(1): 76-80.
 [8] Graver J, Leonard N E. Underwater glider dynamics and control[C]// *Proc of 12th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology*. Saint Paul: IEEE, 2001: 1742-1710.
 [9] Melsaac K A, Ostrowski J P. A geometric approach to anguilliform locomotion: modelling of an underwater eel robot[C]// *Proc of 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Detroit: IEEE, 1999: 2843-2848.
 [10] Khalil W, Gallot G, Boyer F. Dynamic modeling and simulation of a 3-D serial eel-like robot[J]. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics: Part C*, 2007, 37(6): 1259-1268.
 [11] Porez M, Boyer F, Ijspeert A J. Improved lighthill fish swimming model for bioinspired robots-modelling, computational aspects and experimental comparisons[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2014, 33(10): 1322-1341.
 [12] Stevens B L, Lewis F L. *Aircraft control and simulation* [M]. New York: Wiley, 1992.
 [13] Zhang F, Thon J, Thon C, et al. Miniature underwater glider: design, modeling, and experimental results[C]// *Proc of 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA)*. Saint Paul: IEEE, 2012: 4904-4910.
 [14] Kelasidi E, Pettersen K Y, Gravidahl J T. Modeling of underwater snake robots moving in a vertical plane in 3D[C]// *Proc of 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS 2014)*. Chicago: IEEE, 2014: 266-273.