

# 生物启发神经动力学模型的自治水下机器人反步跟踪控制

朱大奇, 杨蕊蕊

(上海海事大学 水下机器人与智能系统实验室, 上海 201306)

**摘要:** 本文提出一种生物启发神经动力学模型的自治水下机器人(autonomous underwater vehicles, AUV)三维轨迹跟踪控制算法. 将AUV在三维空间的运动分为水平面运动和垂直面运动, 针对传统反步轨迹跟踪控制器出现的速度跳变问题, 采用生物启发神经动力学模型, 通过构造一种简单的中间虚拟变量, 同时结合Lyapunov函数设计出轨迹跟踪控制律, 使其控制效果在水平面和垂直面都能够达到全局渐近稳定并且有平滑连续的输出结果, 克服AUV反步轨迹跟踪控制的速度跳变问题. 仿真结果证明了所提控制律的有效性.

**关键词:** 自治水下机器人; 生物启发模型; 运动控制; 全局渐近稳定

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A

## Backstepping tracking control of autonomous underwater vehicles with bio-inspired neurodynamics model

ZHU Da-qi, YANG Rui-rui

(Laboratory of Underwater Vehicles and Intelligent Systems, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** A trajectory tracking control algorithm for autonomous underwater vehicles (AUV) with bio-inspired neurodynamics model is presented. The motion of AUV in three-dimensional space is divided into horizontal movement and vertical movement. To cope with the problem of speed jump in the traditional backstepping trajectory-tracking controller, we introduce an intermediate virtue variable to the bio-inspired neurodynamics model and make use of the Lyapunov function to develop the trajectory-tracking control law. We prove that the control is globally asymptotically stable in both horizontal plane and vertical plane. The simulation validates the correctness and effectiveness of the proposed control law.

**Key words:** autonomous underwater vehicles; a bio-inspired model; motion control; global asymptotically stable

### 1 引言(Introduction)

自治水下机器人(autonomous underwater vehicles, AUV)轨迹跟踪控制是指AUV在有效控制律作用下, 从给定的初始状态出发跟踪惯性坐标系中的参考轨迹, 并保证跟踪位置误差的全局一致渐近稳定<sup>[1-2]</sup>. 由于水下环境的复杂性, 自治水下机器人的欠驱动、强耦合、非线性特性, 使得自治水下机器人的轨迹跟踪控制研究成为一个十分具有挑战性的研究领域. 目前相关研究成果报道还不多<sup>[3]</sup>, 常用的AUV轨迹跟踪控制方法主要有: 传统PID控制方法、滑模控制方法、反步控制方法等.

早期AUV水下跟踪控制大多采用传统的PID控制方法, 它是在6自由度自治水下机器人动力学模型解耦简化的基础上, 在水平面、垂直面上分别实现AUV的轨迹跟踪控制<sup>[4-6]</sup>. 这种传统PID控制有广泛的应用领域与历史, 其控制效果依赖于PID参数, 而PID参数整定又依赖于被控对象的模型, 但由

于AUV动力学模型存在非线性、强耦合以及水动力参数的不确定性; 同时, 在跟踪控制实现前, 需要对AUV动力学模型进行大量简化, 使得这种依赖于水下机器人模型的PID传统轨迹跟踪控制策略, 在许多情况下无法满足实际水下轨迹跟踪控制需要.

由于变结构滑模控制技术(sliding mode control, SMC)对控制对象模型不确定性和外界干扰具有很强的鲁棒性, 因此, 滑模控制技术在AUV控制中得到广泛关注<sup>[7-12]</sup>. 它不仅应用于AUV的状态控制<sup>[7-8]</sup>, 而且在AUV轨迹跟踪控制中有较好的表现<sup>[9-12]</sup>. 滑模控制虽然优点明显, 但也有一个致命的缺陷, 那就是控制“抖动”的存在, 它使水下机器人控制电机频繁切换, 极易产生电气与机械系统故障, 从而导致AUV控制性能与工作性能下降. 目前, 虽然也有学者提出了一些减少滑模控制“抖动”的方法<sup>[12]</sup>, 但都停留在系统仿真研究上, 真正有效应用的报道还未见到.

自治水下机器人轨迹跟踪控制另一个常用方法是反步控制策略(backstepping control, BC). 作为一种计算简单、系统稳定的控制方法, 反步控制首先在地面移动机器人轨迹跟踪控制领域得到广泛应用<sup>[13-17]</sup>. 早期有Fierro R等人<sup>[13]</sup>提出的非完整移动机器人动力学控制, Zhang Q等人<sup>[14-15]</sup>将反步方法与不同神经网络模型结合提出的移动机器人轨迹跟踪控制算法; 近些年, 反步控制被进一步应用到水下机器人轨迹跟踪控制中<sup>[2, 18-20]</sup>, 大多数是将反步控制与其他方法集成使用. 如Lionel L等人<sup>[18]</sup>提出的基于反步控制与Lyapunov函数的AUV非线性路径跟踪控制方法, Jon E R等人<sup>[19]</sup>将反步控制与模型反馈控制结合应用于欠驱动水下机器人控制之中; 高剑等<sup>[20]</sup>将级联系统理论与反步控制结合研究了欠驱动AUV水平面轨迹跟踪策略. 反步控制方法虽然在移动机器人轨迹跟踪控制中应用广泛, 但它也存在重要不足, 即跟踪误差较大、存在跟踪拐点时, 机器人会出现速度跳变问题(短时间内出现大范围的速度变化), 要实现这种速度跳变, 这时需要机器人具备超大数值加速度和对应的驱动力(力矩), 有时甚至无穷大, 这在实际机器人控制中是无法实现的. 对此, 加拿大学者Simon X Y等人<sup>[16-17]</sup>将反步控制方法与生物启发神经动力学模型结合, 解决地面移动机器人轨迹跟踪的速度跳变问题, 取得了比较满意的控制效果. 但对自治水下机器人反步跟踪控制来说, 还未见相关研究成果报道. 另一方面, 自治水下机器人受到载荷、能源及欠驱动的限制, 推进器驱动动力有限, 使其更难满足轨迹跟踪的速度跳变.

本文针对三维水下航行环境中AUV反步控制的速度跳变问题, 将生物启发神经动力学模型应用于自治水下机器人的水下轨迹跟踪控制, 根据自治水下机器人的三维运动学模型, 采用生物启发神经动力学模型构造出简单的中间虚拟变量, 同时结合Lyapunov函数分别设计出三维AUV的水平面和垂直面轨迹跟踪控制律, 实现其对期望轨迹的全局渐近跟踪, 较好解决跟踪期望路径中的速度跳变问题, 满足跟踪控制律与动力约束的匹配.

## 2 三维空间的AUV运动学模型(Three dimensional AUV kinematic model)

此处的自治水下机器人AUV(上海海事大学水下机器人与智能系统实验室)如图1和图2所示, 它安装有4个推进器, 水平面2个推进器, 对称安装于机器人尾部, 控制AUV的进退(surge)和回转(yaw)运动; 在垂直面上机器人重心前后对称安装了2个推进器, 控制AUV的下潜和上浮运动. 固定坐标系的原点 $O$ 取为海面上一固定点,  $OX$ 轴和 $OY$ 轴为在水平面内互为垂直. 载体坐标系是固定于水下机器人上的坐标系, 这里的坐标原点取AUV的重心处. 在惯性坐标系下, AUV的状态用6个空间自由度组成的广义坐标

系向量 $\eta = [x \ y \ z \ \varphi \ \theta \ \psi]^T$ 表示, 其运动状态则表示为 $V = [u \ v \ w \ p \ q \ r]^T$ , 其中 $x, y, z$ 分别为水下机器人在惯性坐标系中的位置;  $\varphi, \theta, \psi$ 分别为水下机器人对惯性坐标系的横倾角、纵倾角、艏向角;  $u, v, w$ 分别为水下机器人线速度矢量在载体坐标系中的3个分量;  $p, q, r$ 分别为水下机器人角速度矢量在载体坐标系中的3个分量.

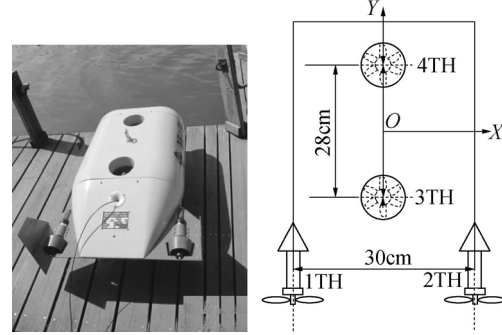


图1 AUV推进器布置

Fig. 1 AUV thruster configuration

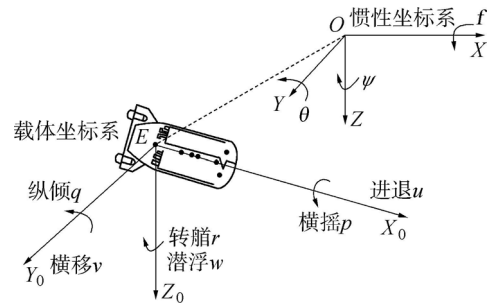


图2 AUV载体坐标系和惯性坐标系

Fig. 2 AUV body-fixed and inertial frame

针对AUV推进器的布置, 在三维空间中AUV只能前后运动、转艏运动和潜浮运动, 不能进行侧移运动、横摇运动和纵倾运动, 因此,  $\phi = \theta = 0$ , 所以惯性坐标系下位姿状态, 其中 $\psi$ 以逆时针方向为正. 同时设定AUV轨迹规划器的参考位姿 $\eta = [x \ y \ z \ \psi]^T$ , 载体坐标系下 $p = q = v = 0$ , 运动状态 $V = [u \ w \ r]^T$ , 同时设定参考速度为 $V_d = [u_d \ w_d \ r_d]^T$ . 三维AUV的运动学模型为<sup>[11]</sup>

$$\dot{\eta} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = J(\eta) V = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ r \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中 $e_\eta = [e_x \ e_y \ e_z \ e_\psi]^T$ 为雅可比矩阵. 定义惯性坐标系下AUV的位姿误差为 $e_\eta$ , 则AUV的误差方程为

$$e_\eta = \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \\ e_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_d - x \\ y_d - y \\ z_d - z \\ \psi_d - \psi \end{bmatrix}. \quad (2)$$

对式(2)求时间导数并化简得到如下微分方程:

$$\dot{e}_\eta = \begin{bmatrix} \dot{e}_x \\ \dot{e}_y \\ \dot{e}_z \\ \dot{e}_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_d - \dot{x} \\ \dot{y}_d - \dot{y} \\ \dot{z}_d - \dot{z} \\ \dot{\psi}_d - \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_d - u \cos \psi + v \sin \psi \\ \dot{y}_d - u \sin \psi - v \cos \psi \\ w_d - w \\ r_d - r \end{bmatrix}. \quad (3)$$

根据上述运动学方程, 三维AUV运动学轨迹跟踪问题实际上是设计合适的有界控制输入量  $V = [u \ v \ w \ r]^T$ , 在式(3)的作用下, 使式(2)渐近收敛于零, 即使期望路径会发生很大的角度跳变(出现拐点), 其输出也是平滑的. 本文在传统的backstepping控制器的基础上, 结合生物启发神经动力学模型和Lyapunov函数设计三维AUV的轨迹跟踪控制律.

### 3 轨迹跟踪控制律设计(Trajectory tracking control law design)

由于AUV常在低速下运动, 可将三维空间AUV的运动控制分解为水平面控制和垂直面控制, 并近似认为各自由度之间不存在耦合关系, 然后分别设计控制器.

#### 3.1 控制器设计问题描述(Controller design problem description)

针对常见的欠驱动AUV推进器布置, 在水平面有两个平行的推进器安装在AUV后面, 没有横向推进器, 水平面只存在前后运动和转舵运动, 而不存在侧向横移动力, 假定初始侧向横移速度为零, 将  $v = 0$  代入式(1)可以得到水平面上AUV的非完整性约束为<sup>[9]</sup>

$$\dot{x} \sin \psi - \dot{y} \cos \psi = 0. \quad (4)$$

在此约束( $v = 0$ )下, 水平面AUV的运动学轨迹跟

踪问题, 实际上是设计合适的有界控制输入量, 使式(2)渐近收敛于零, 即保持AUV的状态  $\eta = [x \ y \ \psi]^T$  跟踪设定状态  $\eta_d = [x_d \ y_d \ \psi_d]^T$ . 在垂直平面AUV只能潜浮运动, 不能进行横摇运动和纵倾运动, 垂直面AUV的运动学轨迹跟踪问题, 实际上是设计合适的有界控制输入量  $V = [w]^T$ , 使得式(2)渐近收敛于零, 即保持AUV的状态  $\eta = [z]^T$  跟踪设定状态  $\eta_d = [z_d]^T$ .

三维AUV轨迹跟踪控制系统工作图如图3所示.  $x_d, y_d, z_d, \psi_d$ 是AUV要跟踪的期望离散路径, 传统的反步轨迹跟踪控制器在跟踪离散路径时虽然能产生较好的轨迹跟踪效果, 但是当有角度突变时, 输出结果不平滑连续. 针对这一问题, 本文首先利用生物启发神经网络产生平滑的虚拟速度  $V_{vx}, V_{vy}, V_{vz}, V_{v\psi}$ , 对虚拟速度进行积分从而得到一条连续的虚拟路径  $x_v, y_v, z_v, \psi_v$ , 该虚拟路径与期望路径之间的误差  $x, y, z, \psi$  作为第1个生物启发神经网络的输入; AUV实际路径  $x, y, z, \psi$  和虚拟路径  $x_v, y_v, z_v, \psi_v$  之间的误差  $e_{x1}, e_{y1}, e_{z1}, e_{\psi1}$  作为第2个生物启发动力学模型的输入, 得到虚拟误差  $V_{sx}, V_{sy}, V_{sz}, V_{s\psi}$ . 虚拟误差  $V_{sx}, V_{sy}, V_{sz}, V_{s\psi}$  作为反步轨迹跟踪控制器输入, 得到AUV实际的前向速度  $u$ 、潜浮速度  $w$  和角速度  $r$ , 再由式(1)可以得到  $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{\psi}$ , 对其进行积分得到AUV的实际轨迹  $x, y, z, \psi$ , 使AUV跟踪期望轨迹. 按照式(2)和式(3)有

$$e_{\eta 1} = \begin{bmatrix} e_{x1} \\ e_{y1} \\ e_{z1} \\ e_{\psi 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_d - x_v \\ y_d - y_v \\ z_d - z_v \\ \psi_d - \psi_v \end{bmatrix} \quad e_{\eta 2} = \begin{bmatrix} e_{x2} \\ e_{y2} \\ e_{z2} \\ e_{\psi 2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_v - x \\ y_v - y \\ z_v - z \\ \psi_v - \psi \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\dot{e}_{\eta 2} = \begin{bmatrix} \dot{e}_{x2} \\ \dot{e}_{y2} \\ \dot{e}_{z2} \\ \dot{e}_{\psi 2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_v - \dot{x} \\ \dot{y}_v - \dot{y} \\ \dot{z}_v - \dot{z} \\ \dot{\psi}_v - \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_v - u \cos \psi + v \sin \psi \\ \dot{y}_v - u \sin \psi - v \cos \psi \\ w_v - w \\ r_v - r \end{bmatrix}. \quad (6)$$

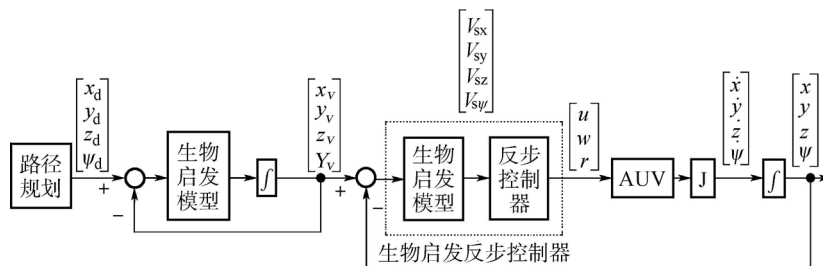


图 3 AUV轨迹跟踪控制系统

Fig. 3 AUV trajectory tracking control system

#### 3.2 生物启发神经动力学模型(Bio-inspired neurodynamic model)

本文生物启发神经动力学模型是一个生物膜电压模型<sup>[16-17]</sup>. 在该模型中, 整个膜电压  $V_m$  的状

态可以在下面的状态方程中描述出来:

$$C_m \frac{dV_m}{dt} = -(E_p + V_m)g_p + (E_{Na} - V_m)g_{Na} - (E_k + V_m)g_k. \quad (7)$$

这里,  $C_m$ 是膜的电势, 参数 $E_k, E_{Na}, E_p$ 分别是钾离子、钠离子和负漏极电流在细胞膜中相应的能量, 时变信号输入函数 $g_k, g_{Na}, g_p$ 分别是钾、钠和负极的导纳. 令

$$\begin{aligned} C_m &= 1, \zeta = E_p + V_m, A = g_p, \\ B &= E_{Na} + E_p, D = E_k - E_p, S^+ = g_{Na}, \end{aligned}$$

可以得到如下的生物启发方程:

$$\dot{\zeta} = -A\zeta + (B - \zeta)S^+(t) - (D + \zeta)S^-(t). \quad (8)$$

这里,  $\zeta$ 是神经元活动(膜电势). 参数 $A, B, D$ 分别是神经元活动的负衰减率、上限和下限. 变量 $S^+, S^-$ 代表了神经元相应的兴奋性和抑制性输入, 反应的是外界环境对神经元的刺激, 在AUV轨迹跟踪控制中, 它代表了轨迹的误差大小与方向. 神经元动态范围限制在区间 $[-D, B]$ , 并且自动调节控制值. 该模型是一个连续可导的方程, 对于任意的兴奋性和抑制性输入, 系统输出确保在区间 $[-D, B]$ 变动, 并且是连续平滑的, 这一特性应用到机器人轨迹跟踪中, 可以较好地保证即使跟踪的离散路径会发生很大的角度跳变, 其输出也是平滑的.

在生物启发模型(7)中, 如果神经元活动 $\zeta$ 在有界区间 $[-D, B]$ 之间变化, 系统就是稳定的. 当有兴奋性输入 $S^+(S^+ \geq 0)$ 时,  $\zeta$ 增大并自动获取控制项 $B - \zeta$ . 如果 $(B - \zeta)S^+$ 使 $\zeta$ 正向变大, 当 $\zeta$ 超过 $B$ ,  $(B - \zeta) < 0$ , 这时 $(B - \zeta)S^+$ 为负, 并使 $\zeta$ 趋于 $B$ 显然,  $\zeta$ 被迫小于 $B$ , 而抑制性输入迫使神经元活动大于 $-D$ 本文中利用第一个生物启发神经动力学模型构造的虚拟速度为

$$\begin{cases} \dot{V}_{vx} = -A_1 V_{vx} + (B_1 - V_{vx})f(e_{x1}) - (D_1 + V_{vx})g(e_{x1}), \\ \dot{V}_{vy} = -A_1 V_{vy} + (B_1 - V_{vy})f(e_{y1}) - (D_1 + V_{vy})g(e_{y1}), \\ \dot{V}_{v\psi} = -A_1 V_{v\psi} + (B_1 - V_{v\psi})f(e_{\psi1}) - (D_1 + V_{v\psi})g(e_{\psi1}), \\ \dot{V}_{vz} = -A_1 V_{vz} + (B_1 - V_{vz})f(e_{z1}) - (D_1 + V_{vz})g(e_{z1}), \end{cases} \quad (9)$$

其中:  $e_{x1} = x_d - x_v, e_{y1} = y_d - y_v, e_{z1} = z_d - z_v, e_{\psi1} = \psi_d - \psi_v, f(e_i) = \max(e_i, 0), g(e_i) = \max(-e_i, 0), i = x_1, y_1, z_1, \psi_1$ , 其中生物启发神经动力学模型有两方面的作用: 一是作为神经网络构造虚拟的速度和角速度变量, 经积分运算产生一条虚拟的连续轨迹, 并将其与实际AUV轨迹比较, 产生跟踪误差作为轨迹跟踪控制器输入; 二是在跟踪控制器部分用来构造反步控制器的中间误差, 由于生物启发神经动力学模型输出的

有界、平滑特性, 即使期望轨迹会出现很大的跳变(如方向拐点等), 最后整个系统也会得到平滑的输出结果.

### 3.3 生物启发离散反步控制律设计及稳定性分析(Bio-inspired discrete backstepping control law design and stability analysis)

针对图3的生物启发反步控制器, 构造位姿误差方程的Lyapunov函数如下:

$$\Gamma = \frac{1}{2}(e_{x2}^2 + e_{y2}^2 + e_{z2}^2) + 2[1 - \cos(\frac{e_{\psi2}}{2})]. \quad (10)$$

很明显, 如果 $e_{x2} = e_{y2} = e_{z2} = e_{\psi2}$ , 则 $\Gamma = 0$ ; 如果 $e_{x2}, e_{y2}, e_{z2}, e_{\psi2}$ 不为零, 则 $\Gamma > 0$ . 证明如下: 对式(10)求导并代入 $v = 0$ 和式(5)得

$$\begin{aligned} \dot{\Gamma} &= e_{x2}\dot{e}_{x2} + e_{y2}\dot{e}_{y2} + e_{z2}\dot{e}_{z2} + \sin(\frac{e_{\psi2}}{2})\dot{e}_{\psi2} = \\ &= e_{x2}(u_v \cos \psi_v - u \cos \psi) + e_{y2}(u_v \sin \psi_v - \\ &= u \sin \psi) + e_{z2}(w_v - w) + \sin(\frac{e_{\psi2}}{2})(r_v - r). \end{aligned} \quad (11)$$

令AUV反步控制器输出为

$$\begin{cases} u = u_v + k_v(e_{x2} \cos \psi + e_{y2} \sin \psi), \\ r = r_v + k_\psi \sin(\frac{e_{\psi2}}{2}) + \\ 2u_v(e_{y2} \cos \frac{\psi_v + \psi}{2} - e_{x2} \sin \frac{\psi_v + \psi}{2}), \\ w = w_v + k_z e_{z2}. \end{cases} \quad (12)$$

将式(12)代入式(11), 可得

$$\begin{aligned} \dot{\Gamma} &= -k_v(e_{x2} \cos \psi + e_{y2} \sin \psi)^2 + e_{x2}u_v(\cos \psi_v - \\ &= \cos \psi) + e_{y2}u_v(\sin \psi_v - \sin \psi) \\ &= -k_\psi \sin^2(\frac{e_{\psi2}}{2}) - 2\sin(\frac{e_{\psi2}}{2})u_v(e_{y2} \cos \frac{\psi_v + \psi}{2} - \\ &= e_{x2} \sin \frac{\psi_v + \psi}{2}) + e_{z2}(w_v - w) = \\ &= -k_v(e_{x2} \cos \psi + e_{y2} \sin \psi)^2 + \\ &= u_v(e_{x2}(\cos \psi_v - \cos \psi) + e_{y2}(\sin \psi_v - \sin \psi)) - \\ &= k_\psi \sin^2(\frac{e_{\psi2}}{2}) - 2u_v(e_{y2} \sin \frac{\psi_v - \psi}{2} \cos \frac{\psi_v + \psi}{2} - \\ &= e_{x2} \sin \frac{\psi_v - \psi}{2} \sin \frac{\psi_v + \psi}{2}) - k_z e_{z2}^2. \end{aligned} \quad (13)$$

由于上式中参数 $k_v, k_\psi$ 和 $k_z$ 均为大于零的常数,  $e_{x2}, e_{y2}, e_{z2}, e_{\psi2}$ 不为零, 则

$$\begin{aligned} \dot{\Gamma} &= -k_v(e_{x2} \cos \psi + e_{y2} \sin \psi)^2 - \\ &= k_\psi \sin^2(\frac{e_{\psi2}}{2}) - k_z e_{z2}^2 \leq 0, \end{aligned} \quad (14)$$

所以整个系统可以达到全局渐近稳定.

针对图3的生物启发反步控制器, 将生物启发神经动力学模型引入到AUV反步控制器设计中.

由式(11)得到生物启发反步控制器的输出为

$$\begin{cases} u = u_v + k_v(V_{sx} \cos \psi + V_{sy} \sin \psi), \\ r = r_v + k_\psi \sin \frac{V_{s\psi}}{2} + \\ \quad 2u_v(V_{sy} \cos \frac{\psi_d + \psi}{2} - V_{sx} \sin \frac{\psi_d + \psi}{2}), \\ w = w_v + k_z V_{sz}. \end{cases} \quad (15)$$

在式(14)中 $V_{sx}$ ,  $V_{sy}$ ,  $V_{sz}$ 和 $V_{s\psi}$ 是由第2个生物启发神经动力学模型构造的中间虚拟误差, 由式(15)计算得到

$$\begin{cases} \dot{V}_{sx} = -A_2 V_{sx} + (B_2 - V_{sx})f(e_{x2}) - \\ \quad (D_2 + V_{sx})g(e_{x2}), \\ \dot{V}_{sy} = -A_2 V_{sy} + (B_2 - V_{sy})f(e_{y2}) - \\ \quad (D_2 + V_{sy})g(e_{y2}), \\ \dot{V}_{s\psi} = -A_2 V_{s\psi} + (B_2 - V_{s\psi})f(e_{\psi2}) - \\ \quad (D_2 + V_{s\psi})g(e_{\psi2}), \\ \dot{V}_{sz} = -A_2 V_{sz} + (B_2 - V_{sz})f(e_{z2}) - \\ \quad (D_2 + V_{sz})g(e_{z2}), \end{cases} \quad (16)$$

其中:  $e_{x2} = x_v - x$ ,  $e_{y2} = y_v - y$ ,  $e_{\psi2} = \psi_v - \psi$ ,  $e_{z2} = z_v - z$ ,  $f(e_j) = \max(e_j, 0)$ ,  $g(e_j) = \max(-e_j, 0)$ ,  $j = x_2, y_2, z_2, \psi_2$ .

#### 4 仿真实验(Simulation experiments)

分别采用本文基于生物启发的控制算法和传统反步轨迹跟踪控制器的控制算法, 在MATLAB环境下通过控制AUV对三维空间折线和三角形进行轨迹跟踪, 通过结果对比验证本文提出的基于生物启发的控制算法的正确性和优越性.

##### 4.1 折线跟踪(Poly-line tracking)

给定三维折线期望路径的参考输入为 $u_d = 1 \text{ m/s}$ ,  $r_d = 0 \text{ rad/s}$ ,  $w_d = 1 \text{ m/s}$ . 在全局坐标下的初始位姿为 $x_d(0) = 0$ ,  $y_d(0) = 1$ ,  $z_d(0) = 0$ ,  $\psi_d(0) = 0$ , 虚拟轨迹的初始位姿为 $x_v(0) = 0$ ,  $y_v(0) = 1$ ,  $z_v(0) = 0$ ,  $\psi_v(0) = 0$ . 同时AUV实际轨迹的初始位置为 $x(0) = 0$ ,  $y(0) = 1$ ,  $z(0) = 0$ ,  $\psi(0) = 0$ . 三维期望路径的初始位置为点(0, 1, 0), 在点(6, 1, 0)和点(6, 5, 4)处各有一个拐点, 终点为(12, 5, 4). 采样时间为0.01 s, 控制参数 $A_1 = A_2 = 15$ ,  $B_1 = B_2 = D_1 = D_2 = 25$ ,  $k_v = 2$ ,  $k_\psi = 2$ ,  $k_z = 8$ ,  $\tau = 0.5$ .

基于生物启发神经动力学模型的轨迹跟踪控制器和反步轨迹跟踪控制器对三维折线的跟踪性能如图4所示. 这两种控制器跟踪折线的速度曲线对比图如图5(a)–5(c)所示. 表1给出了在两个采样周期下, 基于生物启发神经动力学模型的轨迹跟踪控制器和反步轨迹跟踪控制器在各个拐点的速度变化范围.

由图4可以看出, 虽然传统的反步轨迹跟踪控制器和生物启发神经动力学反步控制器都能够跟踪上期望轨迹, 但是, 很明显生物启发的轨迹跟踪控制器对折线有更好的跟踪效果; 由图5看出, 相较于传统反步轨迹跟踪控制器, 基于生物启发轨迹跟踪控制器的跟踪误差小, 跟踪误差能够快速趋于零, 表明基于生物启发的轨迹跟踪控制器误差的变化范围较小, 跟踪精度较高.

由图5(a)–5(c)和表1可以看出, 虽然AUV运动的前向速度、潜浮速度和角速度在大多数情况下都是光滑平稳的, 但是在跟踪期望轨迹的初始位置点(0, 1, 0)和拐点(6, 1, 0), (6, 5, 4)处, 传统反步控制器中出现了速度跳变问题, 基于生物启发的轨迹跟踪控制器的速度跳变均小于传统反步控制器; 特别是两个拐点处, 生物启发反步控制器的前向速度变化只有传统反步控制的一半; 潜浮速度变化量虽然比较接近, 但是生物启发控制器的潜浮速度变化明显平滑、渐变, 而传统反步控制则跳变显著; 角速度变化除初始点比较接近外, 两个拐点处不仅生物启发控制器角速度变化小, 而且平滑、渐变.

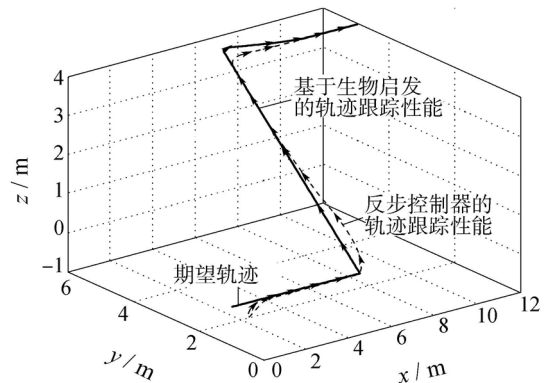


图 4 三维折线轨迹跟踪性能比较

Fig. 4 Comparison of three dimensional poly-line tracking performance

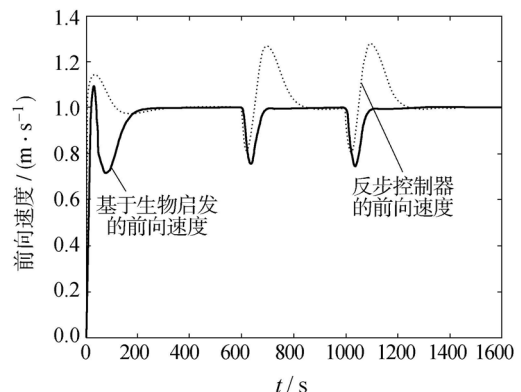


图 5(a) 跟踪折线的前向速度对比图

Fig. 5(a) Surge speed comparison of poly-line tracking

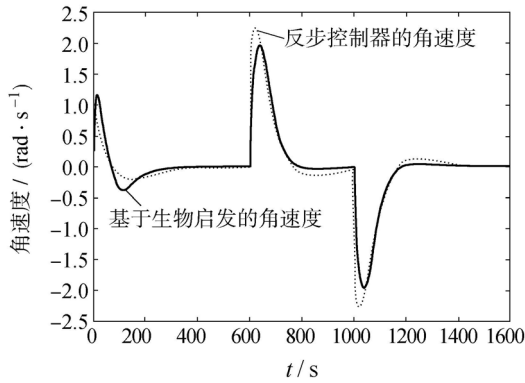


图 5(b) 跟踪折线的角速度对比图

Fig. 5(b) Angle speed comparison of poly-line tracking

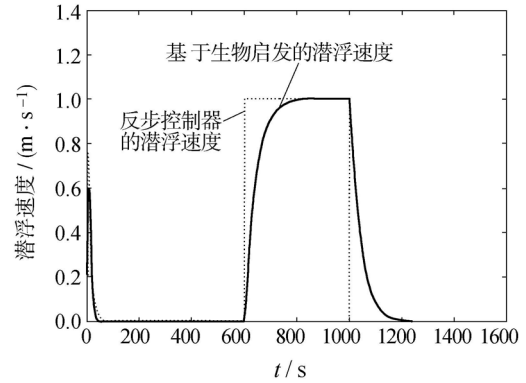


图 5(c) 跟踪折线的潜浮速度对比图

Fig. 5(c) Heave speed comparison of poly-line tracking

表 1 折线轨迹跟踪转折点速度变化比较

Table 1 Speed comparison of poly-line tracking turning point

控制器	前向速度 / (m · s <sup>-1</sup> )			角速度 / (rad · s <sup>-1</sup> )			潜浮速度 / (m · s <sup>-1</sup> )		
	起点	拐点1	拐点2	起点	拐点1	拐点2	起点	拐点1	拐点2
生物启发	1.12	0.25	0.26	1.12	1.81	1.83	0.59	0.86	0.91
反步控制	1.17	0.45	0.46	1.1	2.22	2.31	0.8	1	1

4.2 三角线跟踪(Deltoid line tracking)

给定三角形期望轨迹的参考输入为  $u_d = 1 \text{ m/s}$ ,  $r_d = 0 \text{ rad/s}$ ,  $w_d = 1 \text{ m/s}$ . 在全局坐标下的初始位姿为  $x_d(0) = 0$ ,  $y_d(0) = 1$ ,  $z_d(0) = 0$ ,  $\psi_d(0) = 0$ . 虚拟轨迹的初始位姿为  $x_v(0) = 0$ ,  $y_v(0) = 1$ ,  $z_v(0) = 0$ ,  $\psi_v(0) = 0$ . 同时AUV实际轨迹的初始位置为

$$x(0) = 0.2, y(0) = 0.5, z(0) = 0, \psi(0) = 0.$$

期望三角轨迹起始点为(6, 1, 0), 在点(6, 1, 6)和点(0, 1, 0)处各有一个拐点, 采样时间为0.01 s, 控制参数为

$$A_1 = A_2 = 15, B_1 = B_2 = D_1 = D_2 = 30,$$

$$k_v = 2, k_\psi = 2, k_z = 8.$$

时间常数  $\tau = 0.5$ .

基于生物启发神经动力学模型的轨迹跟踪控制器和反步轨迹跟踪控制器对三维三角线的跟踪性能如图6所示. 这两种控制器跟踪三角线的速度曲线对比图如图7(a)–7(c)所示. 表2给出了在两个采样周期下, 基于生物启发神经动力学模型的轨迹跟踪控制器和反步轨迹跟踪控制器在起始点及各个拐点的速度变化范围.

由图6可以看出, 虽然传统的反步轨迹跟踪控制器和生物启发神经动力学反步控制器都能够跟踪上期望轨迹, 但是, 两者的跟踪效果不同, 相较于传统反步轨迹跟踪控制器, 基于生物启发轨迹

跟踪控制器的跟踪误差小, 跟踪速度快, 跟踪精度较高.

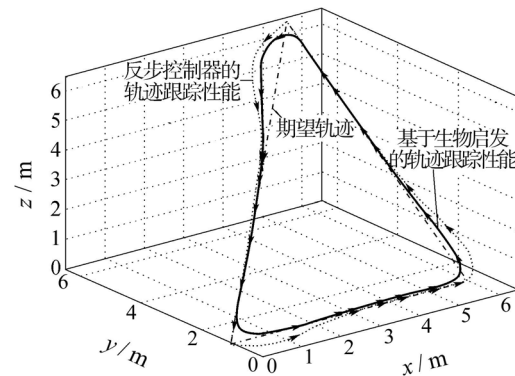


图 6 三维折三角线轨迹跟踪性能比较

Fig. 6 Comparison three dimensional deltoid line tracking performance

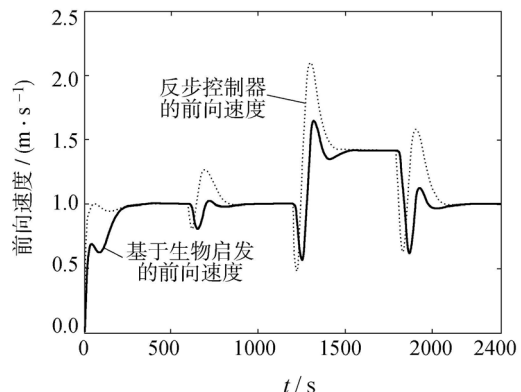


图 7(a) 跟踪三角形的前向速度对比图

Fig. 7(a) Surge speed comparison of deltoid line tracking

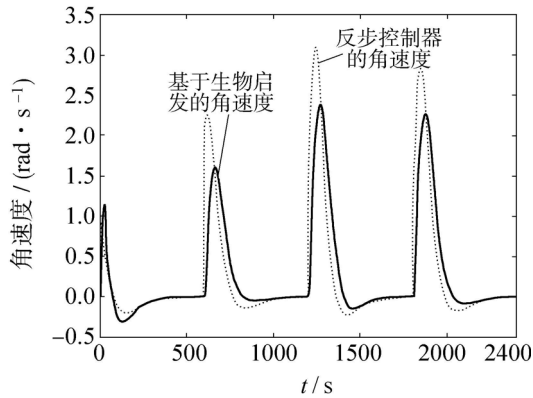


图 7(b) 跟踪三角形的角速度对比图

Fig. 7(b) Angle speed comparison of deltoid line tracking

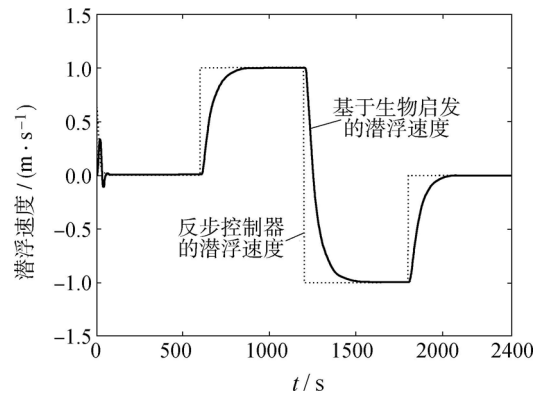


图 7(c) 跟踪三角形的潜浮速度对比图

Fig. 7(c) Heave speed comparison of deltoid line tracking

表 2 三角曲线跟踪拐点速度变化比较

Table 2 Speed comparison of deltoid line tracking turning point

控制器	前向速度 / (m·s <sup>-1</sup> )				角速度 / (rad·s <sup>-1</sup> )				潜浮速度 / (m·s <sup>-1</sup> )			
	起点	拐点1	拐点2	拐点3	起点	拐点1	拐点2	拐点3	起点	拐点1	拐点2	拐点3
生物启发	0.61	0.25	0.41	0.6	1.35	1.51	2.31	2.25	0.35	0.86	1.69	0.91
反步控制	1.02	1.1	1.55	1.12	1.25	2.25	3.15	2.85	0.65	1.01	2.02	1.02

从图7(a)–7(c)和表2可以看出, 虽然AUV运动的前向速度、潜浮速度和角速度在大多数情况下都是光滑平稳的, 但是在跟踪期望轨迹的初始位置点, 和拐点(6, 1, 0), (6, 1, 6), (0, 1, 0)处, 传统反步控制器中出现了速度跳变, 基于生物启发的轨迹跟踪控制器的速度跳变均明显小于传统反步控制器; 特别是两个拐点处, 生物启发反步控制器的前向速度变化只有传统反步控制的一半; 潜浮速度变化量虽然比较接近, 但是生物启发控制器的潜浮速度变化明显平滑、渐变, 而传统反步控制则跳变显著; 角速度变化与之相同, 在两个拐点处不仅生物启发控制器角速度变化小, 而且平滑、渐变。

从上面两个仿真结果可以知道, 由于生物启发神经动力学模型具有连续平滑且有界的输出特性, 将其应用到机器人轨迹跟踪中, 可以较好地解决自治水下机器人反步轨迹跟踪控制的速度跳变问题, 从而满足欠驱动自治水下机器人推进器推力的物理约束, 实现AUV水下轨迹跟踪控制。

### 4.3 结论(Conclusions)

本文研究了三维自治水下机器人的轨迹跟踪问题, 结合生物启发神经动力学模型和反步控制算法构造了全状态水平面和垂直面轨迹跟踪控制器。与传统反步轨迹跟踪控制器相比, 基于生物启发动力学模型的轨迹跟踪控制器较好地解决了传统反步轨迹跟踪控制器中的速度跳变和输出结果

不连续的问题, 并且能快速有效的跟踪期望轨迹, 达到全局渐近稳定。

### 参考文献(References):

- [1] 俞建成, 李强, 张艾群. 水下机器人的神经网络自适应控制 [J]. 控制理论与应用, 2008, 25(1): 9 – 13.  
(YU Jiancheng, LI Qiang, ZHANG Aiqun. Neural network adaptive control for underwater vehicles [J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(1): 9 – 13.)
- [2] LIONEL L, DIDIK S. Nonlinear path-following control of an AUV [J]. *Ocean Engineering*, 2007, 34(2): 1734 – 1744.
- [3] SANTHAKUMAR M, ASOKAN T. Investigations on the hybrid tracking control of an underactuated autonomous underwater robot [J]. *Advanced Robotics*, 2010, 24(11): 1529 – 1556.
- [4] KAMINER I, PASCOAL A, HALLBERG E. Trajectory tracking for autonomous vehicles: an integrated approach to guidance and control [J]. *Journal Guidance, Control and Dynamics*, 1998, 21(1): 29 – 38.
- [5] ANTONELLI G, CACCAVALE F, CHIAVERINI S. A novel adaptive control law for underwater vehicles [J]. *IEEE Transactions on Control Systems and Technology*, 2003, 11(2): 221 – 232.
- [6] 边宇枢, 高志慧, 负超. 6自由度水下机器人动力学分析与运动控制 [J]. 机械工程学报, 2007, 43(7): 87 – 92.  
(BIAN Yushu, GAO Zhihui, YUN Chao. Dynamic analysis and motion control of 6-DOF underwater robot [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(7): 87 – 92.)
- [7] HEALEY A, LIENARD D. Multivariable sliding mode control for autonomous diving and steering of unmanned underwater vehicles [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1993, 18(3): 327 – 339.
- [8] PAN M L, SEOK W H, YONG K L. Discrete-time quasi-sliding mode control of an autonomous underwater vehicle [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1999, 24(3): 388 – 395.
- [9] WALLACE M B, MAX S D, EDWIN K. Depth control of remotely operated underwater vehicles using an adaptive fuzzy sliding mode

- controller [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2008, 56(8): 670-677.
- [10] 马岭, 崔维成. 基于模糊混合控制的自治水下机器人路径跟踪控制 [J]. 控制理论与应用, 2006, 23(3): 341-346.  
(MA Ling, CUI Weicheng. Path following control of autonomous underwater vehicle based upon fuzzy hybrid control [J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(3): 341-346.)
- [11] BAGHERI A, MOGHADDAM J J. Simulation and tracking control based on neural-network strategy and sliding-mode control for underwater remotely operated vehicle [J]. *Neurocomputing*, 2009, 72(8): 1934-1950.
- [12] SERDAR S, BRADLEY J B, RON P P. A chattering-free sliding-mode controller for underwater vehicles with fault-tolerant infinity-norm thrust allocation [J]. *Ocean Engineering*, 2008, 35(1): 1647-1659.
- [13] FIERRO R, LEWIS F L. Control of a nonholonomic mobile robot: backstepping kinematics into dynamics [J]. *Journal of Robotic Systems*, 1997, 14(3): 149-163.
- [14] ZHANG Q, SHIPPEN J, JONES B. Robust backstepping and neural network control of a low-quality nonholonomic mobile robot [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1999, 39(7): 1117-1134.
- [15] TSAI P S, WANG L S, CHANG F R. Systematic backstepping design for b-spline trajectory tracking control of the mobile robot in hierarchical model [C] // *IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*. Taipei: IEEE, 2004, 2: 713-718.
- [16] SIMON X Y, LUO C. A neural network approach to complete coverage path planning [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2004, 34(1): 718-725.
- [17] LUO C, SIMON X Y. A bio-inspired neural network for real-time concurrent map building and complete coverage robot navigation in unknown environment [J]. *IEEE Transaction on Neural Network*, 2008, 19(7): 1279-1298.
- [18] LIONEL L, BRUNO J. Robust nonlinear path-following control of AUV [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2008, 33(2): 89-102.
- [19] JON E R, ASGEIR J S, KRISTIN Y P. Model-based output feedback control of slender-body underactuated AUVs: theory and experiments [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2008, 16(5): 930-946.
- [20] 高剑, 徐德民, 严卫生. 欠驱动自主水下航行器轨迹跟踪控制 [J]. 西北工业大学学报, 2010, 28(3): 404-408.  
(GAO Jian, XU Demin, YAN Weisheng. Applying cascaded systems theory to ensuring globally uniformly asymptotical stability of trajectory tracking controller of underactuated autonomous underwater vehicle (AUV) [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2010, 28(3): 404-408.)

#### 作者简介:

朱大奇 (1964-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能信息处理与水下机器人, E-mail: zdq367@yahoo.com.cn;

杨蕊蕊 (1986-), 女, 硕士研究生, 研究方向为智能信息处理与水下机器人轨迹跟踪, E-mail: yangrui\_ok\_ok@163.com.