第 38 卷第 6 期
2021 年 6 月
控 制 理 论 与 应 用
Control Theory & Applications
Vol. 38 No. 6
Jun. 2021

基于神经网络的欠驱动水下机器人三维同步跟踪和镇定控制

方 凯, 姚佳琪, 李家旺†
(宁波大学 海运学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 研究了欠驱动水下机器人的三维同步跟踪和镇定控制问题, 并考虑了模型参数不确定性、未知外界干扰和输入饱和限制的影响. 针对不同类型期望轨迹的特性, 构造了新的辅助虚拟信号以实现对欠驱动方向的控制. 基于反步法和Lyapunov直接法, 设计了一种饱和自适应统一动力学控制律, 使得AUV的状态误差最终收敛至零点附近的有界区域内, 其中未知模型参数和外部干扰通过基于神经网络的更新律进行估计. 仿真结果表明该控制方法是有效的且具有较好的控制效果.

关键词: 自主水下机器人; 欠驱动; 神经网络; 三维跟踪和镇定; 自适应控制

引用格式: 方凯, 姚佳琪, 李家旺. 基于神经网络的欠驱动水下机器人三维同步跟踪和镇定控制. 控制理论与应用, 2021, 38(6): 731 – 738

DOI: 10.7641/CTA.2020.00265

Three-dimensional simultaneous tracking and stabilization of underactuated autonomous underwater vehicles based on neural network

FANG Kai, YAO Jia-qi, LI Jia-wang†
(Faculty of Maritime and Transportation, Ningbo University, Ningbo Zhejiang 315211, China)

Abstract: This paper addresses the three-dimensional simultaneous tracking and stabilization problem for autonomous underwater vehicles (AUVs), where the effects of modeling uncertainties, unknown external disturbances and input saturation constraints are all taken into consideration. Due to analyzing the characteristics of different types of desired trajectories, two novel auxiliary virtual signals are introduced for the purpose of controlling the underactuated directions. Based on the backstepping technique and Lyapunov's direct method, a saturated adaptive dynamic controller with a unified form is designed to guarantee the error states of AUVs to ultimately converge to bounded areas centered at zero, and while, the neural networks based updating laws are also proposed to estimate the unknown modeling parameters and external disturbances. Simulation results illustrate the effectiveness and acceptable performance of the proposed controller.

Key words: autonomous underwater vehicles; underactuated; neural networks; three-dimensional tracking and stabilization; adaptive control

Citation: FANG Kai, YAO Jiaqi, LI Jiawang. Three-dimensional simultaneous tracking and stabilization of underactuated autonomous underwater vehicles based on neural network. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(6): 731 – 738

1 引言

近年来, 水下机器人(autonomous underwater vehicle, AUV)在海洋资源开发、海底勘探和军事侦察等领域得到了越来越广泛的应用, 也使得对其三维空间运动的控制技术的研究受到了越来越多的重视. 对于AUV的运动控制问题, 其主要难点在于一般情况下AUV都具有欠驱动特性, 即AUV的独立控制输入数目少于其自由度数, 由于不满足Brockett必要条件[1], 因此无法通过连续时不变控制策略实现镇定. 此外, AUV在实际工况下经常受到未知外界干扰、模型参数不确定性和输入饱和限制的影响, 这些也使得AUV的三维运动控制变得更加困难.

目前, 针对AUV的实时三维空间运动控制问题的研究主要可以分为2类: 镇定控制与轨迹跟踪控制. 在镇定控制问题中, 需要选择合适的控制输入形式使得AUV的状态误差收敛到零或零点附近的有界邻域内. 如文献[2–4]中基于四元数形式的6自由度欠驱动AUV模型, 提出了一种连续周期时变控制律以实现位

收稿日期: 2020−05−11; 录用日期: 2020−12−31.
†通信作者. E-mail: lijiawang@nbu.edu.cn; Tel.: +86 18352927971.
本文责任编委: 方勇纯.

置和姿态角的局部指数镇定. 其中文献[2–3]未考虑环境干扰的影响, 最终使状态误差收敛到零点, 而文献[4]考虑了环境干扰的影响, 使控制误差收敛到零点的有界范围内. 在该控制方法基础上, 针对AUV的控制输入饱和限制, 文献[5]中设计了基于模型预测控制的AUV镇定算法. 然而, 上述文献均未考虑大初始误差情况. 与镇定控制问题不同, 在轨迹跟踪控制问题中, 需要设计控制策略使得AUV的状态趋近并跟上满足持续激励条件的时变轨迹, 实现状态误差的收敛. 如文献[6–7]针对欠驱动无人水下航行器的三维轨迹跟踪问题设计了一种基于虚拟速度误差变量的反步控制方法. 文献[8]基于反步法设计了一种输出约束的三维跟踪控制方法. 文献[9]提出了基于生物启发式速度调节方法的欠驱动AUV三维轨迹跟踪控制策略. 但在上述4篇文献中, 系统模型均假设为完全已知. 针对模型参数不确定性和输入饱和限制情况, 文献[10]中提出了欠驱动AUV的三维自适应轨迹跟踪控制方法, 但其并未考虑外部干扰的影响. 文献[11–12]分别通过自适应神经网络和比例积分微分(proportional integral derivative, PID)滑模控制方法解决参数不确定问题和外界干扰, 但均未考虑输入饱和问题.

需要指出的是, 在实际的AUV的三维空间工作任务中, 其可能需要同时具备实现镇定控制和轨迹跟踪控制的能力, 但上述提及的控制方法均无法达到. 考虑到在任务过程中切换不同控制方法可能引起控制系统不稳定或失效, 因此设计一种能够同步实现镇定和跟踪的控制策略对于AUV的技术应用十分有益. 现有的同步镇定和跟踪控制方法主要应用于平面运动系统. 如文献[13]中设计了一种统一控制方法以解决欠驱动船舶的同步镇定和跟踪控制问题, 该方法也可应用于非完整移动机器人的相关控制问题[14–15]. 针对非完整移动机器人的运动学模型, 文献[16]中基于Lyapunov理论和通过引入虚拟控制量设计出一种形式简单的统一控制器. 然而, 上述4篇文献中的控制方法均存在误差收敛速度较慢和对于初始误差较敏感等问题. 针对这些问题, 文献[17]基于动力学振荡器提出了一种统一控制方法, 并针对欠驱动水面船的同步跟踪和调节问题进行了研究. 文献[18–19] 通过采用“横截函数”(transverse function)方法[20]设计了欠驱动船舶的同步跟踪和镇定控制策略. 但是上述3篇文献均未考虑控制输入饱和限制的影响. 针对受到模型参数不确定性影响和输入饱和限制作用下的欠驱动船舶, 文献[21–22]中通过引入辅助控制项设计出一种统一控制策略以实现同步跟踪和镇定.

受到上述研究的启发, 本文针对欠驱动AUV的三维同步跟踪和镇定控制问题开展了研究. 在建立欠驱动AUV空间运动数学模型基础上, 通过分析不同期望轨迹的特点, 设计一种虚拟控制策略以实现对欠驱动方向的控制. 结合反步法和Lyapunov直接法设计思想, 并考虑AUV模型参数不确定性、未知干扰及输入饱和限制等影响, 设计出一种饱和动力学控制器, 使得AUV的误差状态能够收敛到零点附近的有界范围内. 最后, 通过数值仿真实验形式, 对所设计控制策略的有效性进行验证.

2 问题描述

2.1 AUV模型

本文所研究的AUV是具有轴对称外形的刚体并配置有轴向、俯仰和偏航方向上的独立控制输入. 忽略横滚运动的影响, 则可得如下形式的5自由度AUV三维运动数学模型[23], 由于系统控制输入少于其自由度数, 故属于欠驱动系统.

1) 运动学模型:

$$\begin{cases}\dot{x}=u\cos\psi\cos\theta-v\sin\psi+w\cos\psi\sin\theta,\\ \dot{y}=u\sin\psi\cos\theta+v\cos\psi+w\sin\psi\sin\theta,\\ \dot{z}=-u\sin\theta+w\cos\theta,\\ \dot{\theta}=q,\\ \dot{\psi}=\dfrac{r}{\cos\theta}.\end{cases}\tag{1}$$

2) 动力学模型:

$$\begin{cases}m_{\rm u}\dot{u}=m_{\rm v}vr-m_{\rm w}wq-d_{\rm u}u+\tau_{\rm u}+\tau_{\rm wu},\\ m_{\rm v}\dot{v}=-m_{\rm u}ur-d_{\rm v}v+\tau_{\rm wv},\\ m_{\rm w}\dot{w}=m_{\rm u}uq-d_{\rm w}w+\tau_{\rm ww},\\ m_{\rm q}\dot{q}=(m_{\rm w}-m_{\rm u})uw-d_{\rm q}q-\\ \qquad W\overline{GM}_{\rm L}\sin\theta+\tau_{\rm q}+\tau_{\rm wq},\\ m_{\rm r}\dot{r}=(m_{\rm u}-m_{\rm v})uv-d_{\rm r}r+\tau_{\rm r}+\tau_{\rm wr},\end{cases}\tag{2}$$

其中: (x,y,z)表示地面固定坐标系中AUV的空间位置坐标; θ和ψ分别表示AUV的俯仰角和偏航角; (u,v,w)为随体运动坐标系中AUV的线速度, q和r分别表示AUV的俯仰和偏航角速度; $m_i>0(i=u,v,w,q,r)$为包含附加质量的AUV惯性项; $d_i>0(i=u,v,w,q,r)$为AUV的水动力阻尼系数; W和$G\bar{M}_{\rm L}$分别表示AUV排水量和纵稳性高; $\tau_{{\rm w}i}(i=u,v,w,q,r)$表示包含模型参数不确定性和环境干扰影响的未知作用项; $(\tau_{\rm u},\tau_{\rm q},\tau_{\rm r})$表示AUV的控制输入, 考虑到AUV的实际控制输入都存在饱和限制, 因此有

$$|\tau_i|\leqslant\tau_{i{\rm M}},\ i=u,q,r,\tag{3}$$

其中$\tau_{i{\rm M}}>0(i=u,q,r)$表示相应输入的饱和值.

假设 1 式(2)中, 所有的AUV模型参数均为未知常数且未知作用项$\tau_{{\rm w}i}(i=u,v,w,q,r)$连续有界.

假设 2 在纵倾复原力矩作用下, 存在正常数$\theta_{\rm M}<\dfrac{\pi}{2}$, 使得AUV的俯仰角满足$|\theta|\leqslant\theta_{\rm M}$.

假设 3 AUV的横向和垂向速度v和w是被动有

界的, 即存在正常数U_0使得$|v| \leqslant U_0$ 和$|w| \leqslant U_0$.

2.2 控制目标

本文的控制目标是, 针对由式(1)–(2)描述的AUV系统, 通过设计合适的控制输入$(\tau_{\rm u}, \tau_{\rm q}, \tau_{\rm r})$, 在满足输入饱和限制式(3)下, 使得AUV 的实际轨迹$\eta = [x\ \ y\ \ z\ \ \theta\ \ \psi]^{\rm T}$能够对期望轨迹$\eta_{\rm d} = [x_{\rm d}\ \ y_{\rm d}\ \ z_{\rm d}\ \ \theta_{\rm d}\ \ \psi_{\rm d}]^{\rm T}$进行跟踪, 并保证跟踪误差有界. 不失一般性, 该期望轨迹由下述方程产生:

$$\begin{cases} \dot{x}_{\rm d} = u_{\rm d}\cos\psi_{\rm d}\cos\theta_{\rm d} - v_{\rm d}\sin\psi_{\rm d} + \\ \qquad w_{\rm d}\cos\psi_{\rm d}\sin\theta_{\rm d}, \\ \dot{y}_{\rm d} = u_{\rm d}\sin\psi_{\rm d}\cos\theta_{\rm d} + v_{\rm d}\cos\psi_{\rm d} + \\ \qquad w_{\rm d}\sin\psi_{\rm d}\sin\theta_{\rm d}, \\ \dot{z}_{\rm d} = -u_{\rm d}\sin\theta_{\rm d} + w_{\rm d}\cos\theta_{\rm d}, \\ \dot{\theta}_{\rm d} = q_{\rm d}, \\ \dot{\psi}_{\rm d} = \dfrac{r_{\rm d}}{\cos\theta_{\rm d}}, \end{cases} \tag{4}$$

其中$(u_{\rm d}, v_{\rm d}, w_{\rm d}, q_{\rm d}, r_{\rm d})$表示期望速度.

假设 4 期望轨迹(4)满足: 1) 期望速度$i_{\rm d}(i = u, v, w, q, r)$及其一阶导数都是有界的, 且满足$|v_{\rm d}(t)| \leqslant |u_{\rm d}(t)|$和$|w_{\rm d}(t)| \leqslant |u_{\rm d}(t)|$, $\forall t \geqslant 0$; 2) 期望俯仰角$|\theta_{\rm d}| < \dfrac{\pi}{2}$以避免出现奇异现象.

值得注意的是, 假设4中并未对期望速度是否满足持续激励条件做任何限制, 因此, 期望轨迹(4)可以是持续变化的时变运动轨迹, 也可以是固定点.

为便于后续控制设计, 定义AUV的跟踪误差如下:

$$\begin{cases} x_{\rm e} = (x - x_{\rm d})\cos\psi\cos\theta + (y - y_{\rm d})\times \\ \qquad \sin\psi\cos\theta - (z - z_{\rm d})\sin\theta, \\ y_{\rm e} = -(x - x_{\rm d})\sin\psi + (y - y_{\rm d})\cos\psi, \\ z_{\rm e} = (x - x_{\rm d})\cos\psi\sin\theta + (y - y_{\rm d})\times \\ \qquad \sin\psi\sin\theta + (z - z_{\rm d})\cos\theta, \\ \theta_{\rm e} = \theta - \theta_{\rm d}, \\ \psi_{\rm e} = \psi - \psi_{\rm d}. \end{cases} \tag{5}$$

对上式求导并结合式(1)和式(4)可得

$$\begin{cases} \dot{x}_{\rm e} = ry_{\rm e} - qz_{\rm e} + u_{\rm e} - g_{\rm x1}\sin\dfrac{\theta_{\rm e}}{2} - g_{\rm x2}\sin\dfrac{\psi_{\rm e}}{2}, \\ \dot{y}_{\rm e} = -rx_{\rm e} - rz_{\rm e}\tan\theta + v_{\rm e} - g_{\rm y}\sin\dfrac{\psi_{\rm e}}{2}, \\ \dot{z}_{\rm e} = qx_{\rm e} + ry_{\rm e}\tan\theta + w_{\rm e} - g_{\rm z1}\sin\dfrac{\theta_{\rm e}}{2} - \\ \qquad g_{\rm z2}\sin\dfrac{\psi_{\rm e}}{2}, \\ \dot{\theta}_{\rm e} = q_{\rm e}, \\ \dot{\psi}_{\rm e} = \dfrac{r_{\rm e}}{\cos\theta} + r_{\rm d}\left(\dfrac{1}{\cos\theta} - \dfrac{1}{\cos\theta_{\rm d}}\right), \end{cases} \tag{6}$$

其中: $i_{\rm e} = i - i_{\rm d}, i = u, v, w, q, r$表示速度误差; 变量$g_{\rm x1}, g_{\rm x2}, g_{\rm y}, g_{\rm z1}$和$g_{\rm z2}$的具体表达式如下:

$$\begin{cases} g_{\rm x1} = -2\left(u_{\rm d}\sin\dfrac{\theta_{\rm e}}{2} + w_{\rm d}\cos\dfrac{\theta_{\rm e}}{2}\right), \\ g_{\rm x2} = 2\cos\theta\left(v_{\rm d}\cos\dfrac{\psi_{\rm e}}{2} - u_{\rm d}\cos\theta_{\rm d}\sin\dfrac{\psi_{\rm e}}{2} - \right. \\ \qquad \left. w_{\rm d}\sin\theta_{\rm d}\sin\dfrac{\psi_{\rm e}}{2}\right), \\ g_{\rm y} = -2\left(u_{\rm d}\cos\theta_{\rm d}\cos\dfrac{\psi_{\rm e}}{2} + v_{\rm d}\sin\dfrac{\psi_{\rm e}}{2} + \right. \\ \qquad \left. w_{\rm d}\sin\theta_{\rm d}\cos\dfrac{\psi_{\rm e}}{2}\right), \\ g_{\rm z1} = 2\left(u_{\rm d}\cos\dfrac{\theta_{\rm e}}{2} - w_{\rm d}\sin\dfrac{\theta_{\rm e}}{2}\right), \\ g_{\rm z2} = 2\sin\theta\left(v_{\rm d}\cos\dfrac{\psi_{\rm e}}{2} - u_{\rm d}\cos\theta_{\rm d}\sin\dfrac{\psi_{\rm e}}{2} - \right. \\ \qquad \left. w_{\rm d}\sin\theta_{\rm d}\sin\dfrac{\psi_{\rm e}}{2}\right). \end{cases} \tag{7}$$

不难发现式(7)中各项都是有界的. 此时, 经过式(5)的全局可逆变换, 本文所研究的控制问题等价于关于跟踪误差$(x_{\rm e}, y_{\rm e}, z_{\rm e}, \theta_{\rm e}, \psi_{\rm e})$的镇定问题.

3 控制器设计

为实现对式(5)中跟踪误差的镇定控制, 本节将给出一种新型的饱和控制律. 首先, 考虑到AUV的欠驱动特性, 选择误差信号$\psi_{\rm e}$和$\theta_{\rm e}$作为虚拟控制输入分别实现对误差信号$y_{\rm e}$和$z_{\rm e}$的镇定. 为此, 定义以下误差修正方程:

$$\bar{\theta}_{\rm e} = \theta_{\rm e} - \delta_\theta,\ \bar{\psi}_{\rm e} = \psi_{\rm e} - \delta_\psi, \tag{8}$$

其中δ_θ和δ_ψ表示附加控制项并定义如下:

$$\begin{cases} C_\theta^2\ddot{\delta}_\theta + 2C_\theta\dot{\delta}_\theta + \delta_\theta = S_{\rm z}\sin(\omega_1 t), \\ S_{\rm z} = [1 - \tanh(\ell_\nu\sqrt{u_{\rm d}^2 + q_{\rm d}^2})]\tanh(\ell_{\rm z}z_{\rm e}), \\ C_\psi^2\ddot{\delta}_\psi + 2C_\psi\dot{\delta}_\psi + \delta_\psi = S_{\rm y}\sin(\omega_2 t), \\ S_{\rm y} = [1 - \tanh(\ell_\nu\sqrt{u_{\rm d}^2 + r_{\rm d}^2})]\tanh(\ell_{\rm y}y_{\rm e}), \end{cases} \tag{9}$$

其中$\ell_{\rm y}, \ell_{\rm z}, C_\theta, C_\psi, \omega_1$和$\omega_2$均为合适的正常数, $\ell_\nu \gg 1$. 根据式(9)中$S_{\rm y}$和$S_{\rm z}$的定义不难得知

$$\begin{cases} S_{\rm y} \approx \begin{cases} 0,\ \sqrt{u_{\rm d}^2 + r_{\rm d}^2} > 0, \\ 1,\ 其他, \end{cases} \\ S_{\rm z} \approx \begin{cases} 0,\ \sqrt{u_{\rm d}^2 + q_{\rm d}^2} > 0, \\ 1,\ 其他. \end{cases} \end{cases} \tag{10}$$

由上述设计可知误差信号$\bar{\theta}_{\rm e}$和$\bar{\psi}_{\rm e}$需在$z_{\rm e}$和$y_{\rm e}$以及$\theta_{\rm e}$和$\psi_{\rm e}$都收敛至0附近的邻域时镇定, 故可通过镇定误差信号$x_{\rm e}$, $\bar{\theta}_{\rm e}$和$\bar{\psi}_{\rm e}$实现对AUV的5自由度控制.

将式(8)代入式(6)可得

$$\begin{cases}\dot{x}_{\mathrm{e}}=ry_{\mathrm{e}}-qz_{\mathrm{e}}+u_{\mathrm{e}}-g_{\mathrm{x1}}\sin\dfrac{\bar{\theta}_{\mathrm{e}}}{2}-\\ \qquad g_{\mathrm{x2}}\sin\dfrac{\bar{\psi}_{\mathrm{e}}}{2}-g_{\mathrm{x1}}\delta_{\theta}\xi_{\theta}-g_{\mathrm{x2}}\delta_{\psi}\xi_{\psi},\\ \dot{y}_{\mathrm{e}}=-rx_{\mathrm{e}}-rz_{\mathrm{e}}\tan\theta+v_{\mathrm{e}}-g_{\mathrm{y}}\sin\dfrac{\bar{\psi}_{\mathrm{e}}}{2}-\\ \qquad g_{\mathrm{y}}\delta_{\psi}\xi_{\psi},\\ \dot{z}_{\mathrm{e}}=qx_{\mathrm{e}}+ry_{\mathrm{e}}\tan\theta+w_{\mathrm{e}}-g_{\mathrm{z1}}\sin\dfrac{\bar{\theta}_{\mathrm{e}}}{2}-\\ \qquad g_{\mathrm{z2}}\sin\dfrac{\bar{\psi}_{\mathrm{e}}}{2}-g_{\mathrm{z1}}\delta_{\theta}\xi_{\theta}-g_{\mathrm{z2}}\delta_{\psi}\xi_{\psi},\\ \dot{\bar{\theta}}_{\mathrm{e}}=q_{\mathrm{e}}-\dot{\delta}_{\theta},\\ \dot{\bar{\psi}}_{\mathrm{e}}=\dfrac{r_{\mathrm{e}}}{\cos\theta}+r_{\mathrm{d}}(\dfrac{1}{\cos\theta}-\dfrac{1}{\cos\theta_{\mathrm{d}}})-\dot{\delta}_{\psi},\end{cases}\tag{11}$$

式中:

$$\xi_i=\delta_i^{-1}[(\cos\frac{\delta_i}{2}-1)\sin\frac{\bar{i}_{\mathrm{e}}}{2}+\sin\frac{\delta_i}{2}\cos\frac{\bar{i}_{\mathrm{e}}}{2}],$$

$i=\theta,\psi$. 根据式(7)(9)–(10)以及假设4不难得知$g_i\delta_j\approx 0, i=x_1,x_2,y,z_1,z_2,\ j=\theta,\psi$.

下面, 本节将结合反步法和Lyapunov直接法进行控制设计.

步骤 1 定义$L=\sqrt{1+x_{\mathrm{e}}^2+y_{\mathrm{e}}^2+z_{\mathrm{e}}^2}$并构造Lyapunov函数为$V_1=L-1$. 对$V_1$求导并结合式(11)可得

$$\begin{aligned}\dot{V}_1=&\frac{1}{L}(x_{\mathrm{e}}u_{\mathrm{e}}-x_{\mathrm{e}}g_{\mathrm{x1}}\sin\frac{\bar{\theta}_{\mathrm{e}}}{2}-x_{\mathrm{e}}g_{\mathrm{x2}}\sin\frac{\bar{\psi}_{\mathrm{e}}}{2}+\\ &y_{\mathrm{e}}v_{\mathrm{e}}-y_{\mathrm{e}}g_{\mathrm{y}}\sin\frac{\bar{\psi}_{\mathrm{e}}}{2}+z_{\mathrm{e}}w_{\mathrm{e}}-\\ &z_{\mathrm{e}}g_{\mathrm{z1}}\sin\frac{\bar{\theta}_{\mathrm{e}}}{2}-z_{\mathrm{e}}g_{\mathrm{z2}}\sin\frac{\bar{\psi}_{\mathrm{e}}}{2}),\end{aligned}\tag{12}$$

其中为简化考虑并结合上述分析, 已令 $g_i\delta_j=0, i=x_1,x_2,y,z,\ j=\theta,\psi$. 为镇定误差信号$x_{\mathrm{e}}$, 令$u_{\mathrm{e}}$为虚拟控制输入并定义其期望值$\alpha_{\mathrm{u}}$为

$$\alpha_{\mathrm{u}}=-k_{\mathrm{x}}\frac{x_{\mathrm{e}}}{L}+g_{\mathrm{x1}}\sin\frac{\bar{\theta}_{\mathrm{e}}}{2}+g_{\mathrm{x2}}\sin\frac{\bar{\psi}_{\mathrm{e}}}{2},\tag{13}$$

其中 $k_{\mathrm{x}}>0$ 表示控制增益. 将式(13)代入式(12)并令$e_{\mathrm{u}}=u_{\mathrm{e}}-\alpha_{\mathrm{u}}$表示虚拟控制误差, 可得

$$\begin{aligned}\dot{V}_1=&\frac{1}{L}(-k_{\mathrm{x}}\frac{x_{\mathrm{e}}^2}{L}+x_{\mathrm{e}}e_{\mathrm{u}}+y_{\mathrm{e}}v_{\mathrm{e}}-y_{\mathrm{e}}g_{\mathrm{y}}\sin\frac{\bar{\psi}_{\mathrm{e}}}{2}+\\ &z_{\mathrm{e}}w_{\mathrm{e}}-z_{\mathrm{e}}g_{\mathrm{z1}}\sin\frac{\bar{\theta}_{\mathrm{e}}}{2}-z_{\mathrm{e}}g_{\mathrm{z2}}\sin\frac{\bar{\psi}_{\mathrm{e}}}{2}).\end{aligned}\tag{14}$$

步骤 2 为了镇定状态误差y_{e}和z_{e}, 构造如下新的Lyapunov函数:

$$V_2=V_1+2\gamma_\theta^{-1}(1-\cos\frac{\bar{\theta}_{\mathrm{e}}}{2})+2\gamma_\psi^{-1}(1-\cos\frac{\bar{\psi}_{\mathrm{e}}}{2}),\tag{15}$$

其中γ_θ和γ_ψ为正常数. 对V_2求导, 结合式(11)(14), 整理后可得

$$\begin{aligned}&\dot{V}_2=\\ &\frac{1}{L}(-k_{\mathrm{x}}\frac{x_{\mathrm{e}}^2}{L}+x_{\mathrm{e}}e_{\mathrm{u}}+y_{\mathrm{e}}v_{\mathrm{e}}-y_{\mathrm{e}}g_{\mathrm{y}}\sin\frac{\bar{\psi}_{\mathrm{e}}}{2}+\\ &z_{\mathrm{e}}w_{\mathrm{e}}-z_{\mathrm{e}}g_{\mathrm{z1}}\sin\frac{\bar{\theta}_{\mathrm{e}}}{2}-z_{\mathrm{e}}g_{\mathrm{z2}}\sin\frac{\bar{\psi}_{\mathrm{e}}}{2})+\\ &\gamma_\theta^{-1}\sin\frac{\bar{\theta}_{\mathrm{e}}}{2}(q_{\mathrm{e}}-\dot{\delta}_\theta)+\gamma_\psi^{-1}\sin\frac{\bar{\psi}_{\mathrm{e}}}{2}[\frac{r_{\mathrm{e}}}{\cos\theta}-\\ &r_{\mathrm{d}}(\frac{1}{\cos\theta}-\frac{1}{\cos\theta_{\mathrm{d}}})-\dot{\delta}_\psi].\end{aligned}\tag{16}$$

选择q_{e}和r_{e}作为虚拟控制输入并令其期望值为

$$\begin{cases}\alpha_{\mathrm{q}}=-k_\theta\sin\dfrac{\bar{\theta}_{\mathrm{e}}}{2}+\dot{\delta}_\theta+\gamma_\theta g_{\mathrm{z1}}\dfrac{z_{\mathrm{e}}}{L},\\ \alpha_{\mathrm{r}}=\cos\theta(-k_\psi\sin\dfrac{\bar{\psi}_{\mathrm{e}}}{2}+\dot{\delta}_\psi+\gamma_\psi g_{\mathrm{y}}\dfrac{y_{\mathrm{e}}}{L}+\\ \qquad\gamma_\psi g_{\mathrm{z2}}\dfrac{z_{\mathrm{e}}}{L})+\dfrac{r_{\mathrm{d}}}{\cos\theta_{\mathrm{d}}}(\cos\theta_{\mathrm{d}}-\cos\theta),\end{cases}\tag{17}$$

其中: α_{q}和α_{r}分别表示q_{e}和r_{e}的期望值; k_θ和k_ψ为正常数, 表示控制增益. 将式(17)代入式(16)并定义$e_i=i_{\mathrm{e}}-\alpha_i(i=q,r)$为虚拟控制误差, 则有

$$\begin{aligned}\dot{V}_2=&\frac{1}{L}(-k_{\mathrm{x}}\frac{x_{\mathrm{e}}^2}{L}+x_{\mathrm{e}}e_{\mathrm{u}}+y_{\mathrm{e}}v_{\mathrm{e}}+z_{\mathrm{e}}w_{\mathrm{e}})-\\ &k_\theta\gamma_\theta^{-1}\sin^2\frac{\bar{\theta}_{\mathrm{e}}}{2}+\gamma_\theta^{-1}e_{\mathrm{q}}\sin\frac{\bar{\theta}_{\mathrm{e}}}{2}-\\ &k_\psi\gamma_\psi^{-1}\sin^2\frac{\bar{\psi}_{\mathrm{e}}}{2}+\gamma_\psi^{-1}\frac{e_{\mathrm{r}}}{\cos\theta}\sin\frac{\bar{\psi}_{\mathrm{e}}}{2}.\end{aligned}\tag{18}$$

步骤 3 为了镇定虚拟控制误差$e_i(i=u,q,r)$, 下面将对实际控制输入$\tau_i(i=u,q,r)$进行设计. 首先, 为了避免由于对虚拟控制信号$\alpha_i(i=u,q,r)$直接求导而引起的控制形式复杂问题, 引入下述一阶滤波器:

$$C_\alpha\dot{\bar{\alpha}}_i+\bar{\alpha}_i=\alpha_i,\ i=u,q,r,\tag{19}$$

其中$C_\alpha>0$为时间常数. 定义新的误差信号$\bar{e}_i=i_{\mathrm{e}}-\bar{\alpha}_i$和$\tilde{\alpha}_i=\bar{\alpha}_i-\alpha_i, i=u,q,r$, 可知

$$e_i=\bar{e}_i+\tilde{\alpha}_i,\ i=u,q,r.\tag{20}$$

结合假设4并由式(13)(17)和式(19)不难得知, α_i和$\bar{\alpha}_i$ $(i=u,q,r)$都是有界的, 因此, $\tilde{\alpha}_i(i=u,q,r)$也是有界的, 且当$C_\alpha$足够小时衰减至充分小.

结合式(2)对$\bar{e}_i(i=u,q,r)$求导可得

$$m_i\dot{\bar{e}}_i=f_i+\tau_i-m_i\dot{\bar{\alpha}}_i,\ i=u,q,r,\tag{21}$$

其中:

$$\begin{cases}f_{\mathrm{u}}=m_{\mathrm{v}}vr-m_{\mathrm{w}}wq-d_{\mathrm{u}}u+\tau_{\mathrm{wu}}-m_{\mathrm{u}}\dot{u}_{\mathrm{d}},\\ f_{\mathrm{q}}=(m_{\mathrm{w}}-m_{\mathrm{u}})uw-d_{\mathrm{q}}q-WG\bar{M}_{\mathrm{L}}\sin\theta+\\ \qquad\tau_{\mathrm{wq}}-m_{\mathrm{q}}\dot{q}_{\mathrm{d}},\\ f_{\mathrm{r}}=(m_{\mathrm{u}}-m_{\mathrm{v}})uv-d_{\mathrm{r}}r+\tau_{\mathrm{wr}}-m_{\mathrm{r}}\dot{r}_{\mathrm{d}}.\end{cases}\tag{22}$$

考虑到式(21)中的f_i和$m_i\dot{\alpha}_i$均包含未知项, 结合神经网络方法的全局近似特性[24], 本文采用如下形式的径向基函数神经网络(radial basis function neural network, RBFNN)对其进行估计:

$$\begin{cases} f_i - m_i\dot{\alpha}_i = W_i^{*\mathrm{T}}\varrho(\phi_i) + \epsilon_i^*,\ i = u, q, r, \\ \varrho(\phi_i) = [\varrho_1(\phi_i)\ \ \varrho_2(\phi_i)\ \ \cdots\ \ \varrho_{N_h}(\phi_i)]^{\mathrm{T}}, \\ \varrho_j(\phi_i) = \exp(-\dfrac{\|\phi_i - \mu_{ij}\|}{\sigma_{ij}^2}),\ j = 1, 2, \cdots, N_h, \end{cases} \tag{23}$$

其中:

$$\phi_{\mathrm{u}} = [u\ \ v\ \ w\ \ q\ \ r\ \ \dot{\alpha}_{\mathrm{u}}]^{\mathrm{T}},\ \phi_{\mathrm{q}} = [u\ \ w\ \ q\ \ \theta\ \ \dot{\alpha}_{\mathrm{q}}]^{\mathrm{T}},$$
$$\phi_{\mathrm{r}} = [u\ \ v\ \ r\ \ \dot{\alpha}_{\mathrm{r}}]^{\mathrm{T}},$$

$W_i^*(i = u, q, r)$是理想的定常权重向量, 满足$\|W_i^*\| \leqslant W_{i\mathrm{M}}$, $W_{i\mathrm{M}}$为正常数; ϵ_i^*表示理想估计误差, 满足$|\epsilon_i^*| \leqslant \epsilon_0$, ϵ_0为任意小的正常数; N_h表示神经网络隐藏层的神经元数; μ_{ij}和σ_{ij}分别表示基函数的数学期望和均方差. 利用式(23), 可将式(21)改写为

$$m_i\dot{\bar{e}}_i = W_i^{*\mathrm{T}}\varrho(\phi_i) + \epsilon_i^* + \tau_i,\ i = u, q, r. \tag{24}$$

构造新的Lyapunov函数

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2}\sum_{i=u,q,r}\gamma_i m_i \bar{e}_i^2, \tag{25}$$

其中$\gamma_i(i = u, q, r)$为合适的正常数. 对V_3求导并结合式(18)(20)和式(24)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 = &\frac{1}{L}(-k_{\mathrm{x}}\frac{x_{\mathrm{e}}^2}{L} + x_{\mathrm{e}}\bar{e}_{\mathrm{u}} + x_{\mathrm{e}}\tilde{\alpha}_{\mathrm{u}} + y_{\mathrm{e}}v_{\mathrm{e}} + z_{\mathrm{e}}w_{\mathrm{e}}) - \\ &k_\theta\gamma_\theta^{-1}\sin^2\frac{\bar{\theta}_{\mathrm{e}}}{2} + \gamma_\theta^{-1}(\bar{e}_{\mathrm{q}} + \tilde{\alpha}_{\mathrm{q}})\sin\frac{\bar{\theta}_{\mathrm{e}}}{2} - \\ &k_\psi\gamma_\psi^{-1}\sin^2\frac{\bar{\psi}_{\mathrm{e}}}{2} + \frac{\bar{e}_{\mathrm{r}} + \tilde{\alpha}_{\mathrm{r}}}{\gamma_\psi\cos\theta}\sin\frac{\bar{\psi}_{\mathrm{e}}}{2} + \\ &\sum_{i=u,q,r}\gamma_i\bar{e}_i[W_i^{*\mathrm{T}}\varrho(\phi_i) + \epsilon_i^* + \tau_i]. \end{aligned} \tag{26}$$

选择实际控制输入为

$$\tau_i = -k_i\tanh\bar{e}_i - \hat{W}_i^{\mathrm{T}}\varrho(\phi_i) - \epsilon_0\mathrm{sgn}\,\bar{e}_i - \chi_i, \tag{27}$$

其中: $i = u, q, r$, $k_i > 0$表示控制增益; sgn$(\cdot)$表示标准符号函数;

$$\chi_{\mathrm{u}} = \frac{x_{\mathrm{e}}}{\gamma_{\mathrm{u}}L},\ \chi_{\mathrm{q}} = \frac{\sin\dfrac{\bar{\theta}_{\mathrm{e}}}{2}}{\gamma_\theta\gamma_{\mathrm{q}}},\ \chi_{\mathrm{r}} = \frac{\sin\dfrac{\bar{\psi}_{\mathrm{e}}}{2}}{\gamma_\psi\gamma_{\mathrm{r}}\cos\theta}.$$

根据L定义以及三角函数的性质可知

$$\frac{|x_{\mathrm{e}}|}{L} \leqslant 1,\ |\sin\frac{\bar{\theta}_{\mathrm{e}}}{2}| \leqslant 1,\ |\sin\frac{\bar{\psi}_{\mathrm{e}}}{2}| \leqslant 1,$$

$|\cos\theta| \geqslant \cos\theta_{\mathrm{M}} > 0$, θ_{M}表示θ的最大值. 根据上述结果可得: $|\chi_i| \leqslant \chi_{i\mathrm{M}}, i = u, q, r$, 其中:

$$\chi_{\mathrm{uM}} = \frac{1}{\gamma_{\mathrm{u}}},\ \chi_{\mathrm{qM}} = \frac{1}{\gamma_\theta\gamma_{\mathrm{q}}},\ \chi_{\mathrm{rM}} = \frac{1}{\gamma_\psi\gamma_{\mathrm{r}}\cos\theta_{\mathrm{M}}},$$

$\hat{W}_i$为W_i^*的估计值, 其具体形式待后续确定. 将式(27)代入式(26)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 = &\frac{1}{L}(-k_{\mathrm{x}}\frac{x_{\mathrm{e}}^2}{L} + x_{\mathrm{e}}\tilde{\alpha}_{\mathrm{u}} + y_{\mathrm{e}}v_{\mathrm{e}} + z_{\mathrm{e}}w_{\mathrm{e}}) - \\ &\frac{k_\theta}{\gamma_\theta}\sin^2\frac{\bar{\theta}_{\mathrm{e}}}{2} + \frac{\tilde{\alpha}_{\mathrm{q}}}{\gamma_\theta}\sin\frac{\bar{\theta}_{\mathrm{e}}}{2} - \frac{k_\psi}{\gamma_\psi}\sin^2\frac{\bar{\psi}_{\mathrm{e}}}{2} + \\ &\frac{\tilde{\alpha}_{\mathrm{r}}\sin\dfrac{\bar{\psi}_{\mathrm{e}}}{2}}{\gamma_\psi\cos\theta} + \sum_{i=u,q,r}\gamma_i\bar{e}_i[-k_i\tanh\bar{e}_i + \\ &\tilde{W}_i^{\mathrm{T}}\varrho(\phi_i) + \epsilon_i^* - \epsilon_0\mathrm{sgn}\,\bar{e}_i], \end{aligned} \tag{28}$$

其中$\tilde{W}_i = W_i^* - \hat{W}_i(i = u, q, r)$表示估计误差.

步骤 4　为了确定估计值$\hat{W}_i(i = u, q, r)$的具体表达式, 选择以下Lyapunov函数:

$$V_4 = V_3 + \frac{1}{2}\sum_{i=u,q,r}\tilde{W}_i^{\mathrm{T}}\varGamma_i^{-1}\tilde{W}_i, \tag{29}$$

其中$\varGamma_i \in \mathbb{R}^{N_h\times N_h}(i = u, q, r)$为对称正定矩阵. 结合式(28), 对$V_4$求导, 并利用性质$\dot{\tilde{W}}_i = -\dot{\hat{W}}_i$, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_4 = &\frac{1}{L}(-k_{\mathrm{x}}\frac{x_{\mathrm{e}}^2}{L} + x_{\mathrm{e}}\tilde{\alpha}_{\mathrm{u}} + y_{\mathrm{e}}v_{\mathrm{e}} + z_{\mathrm{e}}w_{\mathrm{e}}) - \\ &\frac{k_\theta}{\gamma_\theta}\sin^2\frac{\bar{\theta}_{\mathrm{e}}}{2} + \frac{\tilde{\alpha}_{\mathrm{q}}}{\gamma_\theta}\sin\frac{\bar{\theta}_{\mathrm{e}}}{2} - \frac{k_\psi}{\gamma_\psi}\sin^2\frac{\bar{\psi}_{\mathrm{e}}}{2} + \\ &\frac{\tilde{\alpha}_{\mathrm{r}}\sin\dfrac{\bar{\psi}_{\mathrm{e}}}{2}}{\gamma_\psi\cos\theta} + \sum_{i=u,q,r}\{\gamma_i\bar{e}_i[-k_i\tanh\bar{e}_i + \\ &\tilde{W}_i^{\mathrm{T}}\varrho(\phi_i) + \epsilon_i^* - \epsilon_0\mathrm{sgn}\,\bar{e}_i] - \tilde{W}_i^{\mathrm{T}}\varGamma_i^{-1}\dot{\hat{W}}_i\}. \end{aligned} \tag{30}$$

考虑到理想权重向量$W_i^*(i = u, q, r)$是有界的, 因此选择估计值$\hat{W}_i(i = u, q, r)$的自适应更新律为

$$\dot{\hat{W}}_i = \begin{cases} \dfrac{\varGamma_i}{\gamma_i}\bar{e}_i\varrho_i, & \|\hat{W}_i\| \leqslant W_{i\mathrm{M}}\text{或}\hat{W}_i^{\mathrm{T}}\varrho_i\bar{e}_i \leqslant 0, \\ 0, & \text{其他}, \end{cases} \tag{31}$$

其中$\varrho_i = \varrho(\phi_i)$. 由式(31)不难看出, 该投影算子具有如下性质: 1) 当$\|\hat{W}_i(0)\| \leqslant W_{i\mathrm{M}}$时, 则有$\|\hat{W}_i(t)\| \leqslant W_{i\mathrm{M}}, \forall t \geqslant 0$; 2) $\tilde{W}_i^{\mathrm{T}}(\dot{\hat{W}}_i - \dfrac{\varGamma_i}{\gamma_i}\bar{e}_i\varrho_i) \geqslant 0$.

4　稳定性分析

下面给出本文的主要结论.

定理 1　针对由式(1)–(2)描述的AUV三维运动模型, 当假设1–4成立时, 对于如式(4)表示的期望轨迹, 包括时变轨迹和固定点等, 在控制器如式(13)(17)(27)作用下, 结合自适应律如式(31), 能够保证AUV三维跟踪误差收敛到原点附近的有界邻域内. 此外, 若选择控制参数k_i, $W_{i\mathrm{M}}$, $\gamma_i(i = u, q, r)$, N_h, γ_θ和γ_ψ满足如下不等式:

$$k_i + \sqrt{N_h}W_{i\mathrm{M}} + \epsilon_0 + \chi_{i\mathrm{M}} \leqslant \tau_{i\mathrm{M}},\ i = u, q, r, \tag{32}$$

则控制输入式(27)满足饱和限制条件(3).

证 在式(30)中, 前文已有

$$\frac{|x_\mathrm{e}|}{L} \leqslant 1,\ |\sin\frac{\bar\theta_\mathrm{e}}{2}| \leqslant 1,\ |\sin\frac{\bar\psi_\mathrm{e}}{2}| \leqslant 1,$$
$$|\cos\theta| \geqslant \cos\theta_\mathrm{M} > 0,$$

类似地可知

$$\frac{|y_\mathrm{e}|}{L} \leqslant 1,\ \frac{|z_\mathrm{e}|}{L} \leqslant 1,\ |\epsilon_i^*| \leqslant \epsilon_0,\ |\bar e_i| \geqslant |\tanh\bar e_i|,$$

结合式(31)的第2个性质, 可得

$$\begin{aligned}\dot V_4 \leqslant & -k_\mathrm{x}\frac{x_\mathrm{e}^2}{L^2} + |\tilde\alpha_\mathrm{u}| + |v_\mathrm{e}| + |w_\mathrm{e}| - \\ & \frac{k_\theta}{\gamma_\theta}\sin^2\frac{\bar\theta_\mathrm{e}}{2} + \frac{|\tilde\alpha_\mathrm{q}|}{\gamma_\theta} - \frac{k_\psi}{\gamma_\psi}\sin^2\frac{\bar\psi_\mathrm{e}}{2} + \\ & \frac{|\tilde\alpha_\mathrm{r}|}{\gamma_\psi\cos\theta_\mathrm{M}} - \sum_{i=u,q,r}\gamma_i k_i\tanh^2\bar e_i. \end{aligned} \tag{33}$$

考虑到$|v_\mathrm{e}| \leqslant |v| + |v_\mathrm{d}|$和$|w_\mathrm{e}| \leqslant |w| + |w_\mathrm{d}|$, 则根据假设3–4不难得知, v_e和w_e都是有界的. 另外, 由前述分析可知$\tilde\alpha_i(i = u, q, r)$也是有界的. 因此, 式(33)可简化为

$$\dot V_4 \leqslant -K\|X\|^2 + C_0, \tag{34}$$

其中:

$$X = [\frac{x_\mathrm{e}}{L}\ \sin\frac{\bar\theta_\mathrm{e}}{2}\ \sin\frac{\bar\psi_\mathrm{e}}{2}\ \tanh\bar e_\mathrm{u}\ \tanh\bar e_\mathrm{q}\ \tanh\bar e_\mathrm{r}]^\mathrm{T},$$
$$K = \min(k_\mathrm{x}, \frac{k_\theta}{\gamma_\theta}, \frac{k_\psi}{\gamma_\psi}, \gamma_\mathrm{u}k_\mathrm{u}, \gamma_\mathrm{q}k_\mathrm{q}, \gamma_\mathrm{r}k_\mathrm{r}),$$
$$C_0 = |\tilde\alpha_\mathrm{u}|_\mathrm{M} + |v_\mathrm{e}|_\mathrm{M} + |w_\mathrm{e}|_\mathrm{M} + \frac{|\tilde\alpha_\mathrm{q}|_\mathrm{M}}{\gamma_\theta} + \frac{|\tilde\alpha_\mathrm{r}|_\mathrm{M}}{\gamma_\psi\cos\theta_\mathrm{M}},$$

上述表示中下标“M”表示相应数值的最大值. 由式(34)可知, 当$\|X\| > \sqrt{\dfrac{C_0}{K}}$时, $\dot V_4 < 0$, 即V_4是严格递减的, 则根据V_4的定义可知, 跟踪误差$(x_\mathrm{e}, y_\mathrm{e}, z_\mathrm{e}, \theta_\mathrm{e}, \psi_\mathrm{e})$均渐近收敛. 当$\|X\| \leqslant \sqrt{\dfrac{C_0}{K}}$时, 由式(34)可知$|\dot V_4| \leqslant C_0$, 即$V_4$是一致连续的, 则根据$V_4$的定义可知$x_\mathrm{e}$也是一致连续的, 考虑到$\dot x_\mathrm{e}$存在, 这意味着$\dot x_\mathrm{e}$是有界的. 此时, 由式(11)中第1个方程不难得知$(ry_\mathrm{e} - qz_\mathrm{e})$应是有界的, 而由式(9)(17)可知, r和q为有界信号, 且当y_e和z_e不为0时, r和q不恒为0, 因此y_e和z_e也是有界的. 综上, AUV的跟踪误差$(x_\mathrm{e}, y_\mathrm{e}, z_\mathrm{e}, \theta_\mathrm{e}, \psi_\mathrm{e})$均会收敛至零点附近的有界邻域内.

此外, 由式(27)可知, 控制输入满足以下不等式:

$$|\tau_i| \leqslant k_i + \|\hat W_i\|\|\varrho_i\| + \epsilon_0 + \chi_{i\mathrm{M}},\ i = u, q, r. \tag{35}$$

根据式(31)的第1个性质可知$\|\hat W_i\| \leqslant W_{i\mathrm{M}}$. 另外, 由式(23)可得$\|\varrho_i\| \leqslant \sqrt{N_h}$. 将上述结果代入式(35), 可得

$$|\tau_i| \leqslant k_i + \sqrt{N_h}W_{i\mathrm{M}} + \epsilon_0 + \chi_{i\mathrm{M}},\ i = u, q, r. \tag{36}$$

若选择控制参数$k_i, W_{i\mathrm{M}}, \gamma_i(i = u, q, r), N_h, \gamma_\theta$和$\gamma_\psi$满足式(32), 代入式(36)有$|\tau_i| \leqslant \tau_{i\mathrm{M}}$, 此即为饱和限制条件式(3). 证毕.

5 仿真结果

为了验证上述控制方法的有效性, 本节对某型AUV的三维同步跟踪和镇定问题进行了数值仿真实验. AUV模型参数为[25]

$$m_\mathrm{u} = 25\ \mathrm{kg},\ m_\mathrm{v} = 17.5\ \mathrm{kg},\ m_\mathrm{w} = 30\ \mathrm{kg},$$
$$m_\mathrm{q} = 22.5\ \mathrm{kg\cdot m^2},\ m_\mathrm{r} = 15\ \mathrm{kg\cdot m^2},$$
$$W\overline{GM}_\mathrm{L} = 5\ \mathrm{Nm},\ d_\mathrm{u} = 30\ \mathrm{kg\cdot s^{-1}},\ d_\mathrm{v} = 30\ \mathrm{kg\cdot s^{-1}},$$
$$d_\mathrm{w} = 30\ \mathrm{kg\cdot s^{-1}},\ d_\mathrm{q} = 20\ \mathrm{kg\cdot s^{-1}},\ d_\mathrm{r} = 20\ \mathrm{kg\cdot s^{-1}}.$$

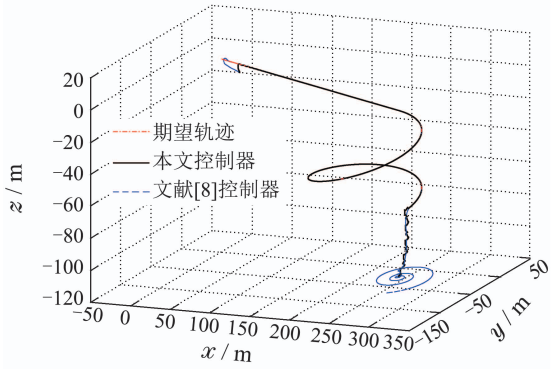
未知干扰项: $\tau_{\mathrm{w}i} = 0.5\sin(0.1t), i = u, v, w, q, r$. 饱和输入限制为$\tau_\mathrm{uM} = 100$ N, $\tau_\mathrm{qM} = \tau_\mathrm{rM} = 100$ Nm.

在仿真中, 期望轨迹设定为由时变轨迹和固定点构成的复合轨迹形式, 其中: 在仿真时间$t \leqslant 150$ s时, $u_\mathrm{d} = 1.5$ m/s, 其余速度和角速度均为0, 即期望轨迹为直线; 在$t \in (150, 450]$ s时, $u_\mathrm{d} = 1.5$ m/s和$r_\mathrm{d} = -\dfrac{\pi}{120}$rad/s, 其余速度和角速度均为0, 即期望轨迹为圆形; 在仿真时间$t > 450$ s时, 期望轨迹为固定点(300 m, −100 m, −100 m, 0 rad, 0 rad); 期望轨迹的初始状态设定为$x_\mathrm{d}(0) = 0$ m, $y_\mathrm{d}(0) = 0$ m, $z_\mathrm{d}(0) = 0$ m, $\theta_\mathrm{d}(0) = 0.1$ rad, $\psi_\mathrm{d}(0) = 0$ rad. AUV的初始状态为$x(0) = 15$ m, $y(0) = 10$ m, $z(0) = -10$ m, $\theta(0) = 0$ rad, $\psi(0) = 0$ rad. AUV的初始速度和角速度均为0. 控制参数选择为

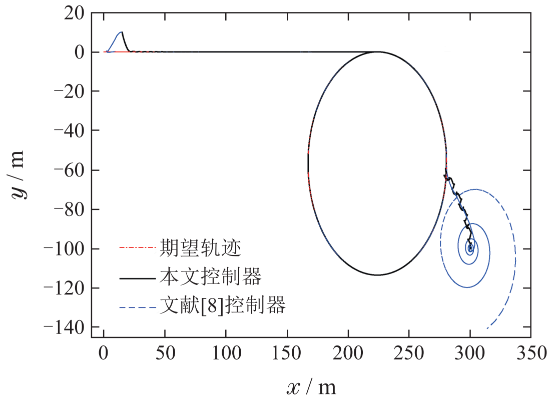
$$C_\theta = C_\psi = 0.2,\ \ell_\nu = 20,\ \ell_\mathrm{y} = \ell_\mathrm{z} = 10,$$
$$\omega_1 = 0.4,\ \omega_2 = 0.6,\ k_\mathrm{x} = 2.5,\ k_\theta = k_\psi = 1.5,$$
$$\gamma_\theta = \gamma_\psi = 0.5,\ C_\alpha = 0.2,\ k_\mathrm{u} = 30,$$
$$k_\mathrm{q} = k_\mathrm{r} = 20,\ \gamma_\mathrm{u} = \gamma_\mathrm{q} = \gamma_\mathrm{r} = 1,$$
$$\varGamma_i = 2I_{8\times 8},\ W_{i\mathrm{M}} = 20,\ i = u, q, r,$$
$$N_h = 8,\ \epsilon_0 = 10.$$

仿真结果如图1所示. 为了更好地对比本文控制方法的性能, 在仿真中加入了文献[8]方法的对比结果.

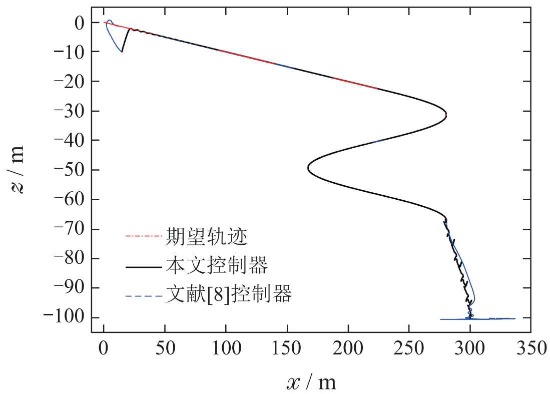
由上述仿真结果可知, 在本文控制方法作用下, AUV能够实现对复杂三维空间期望轨迹的跟踪, 包括时变轨迹和固定点; 跟踪误差均能收敛至零点附近的有界区域内; 而对比文献[8]的控制方法只能实现时变轨迹的跟踪, 当目标轨迹为固定点时, AUV的位置误差和控制输入无法收敛. 且由于对比文献[8]未考虑饱和输入限制, 其第一阶段时变轨迹的控制输入远大于本文的控制器; 本文在饱和动力学控制式(27)作用下, 所有的控制输入均始终处于饱和限制范围内, 有效的避免了因控制输入过大所引起的控制失效和跟踪性能下降的问题. 另外根据上图可知θ的最大值最终收敛至1左右.



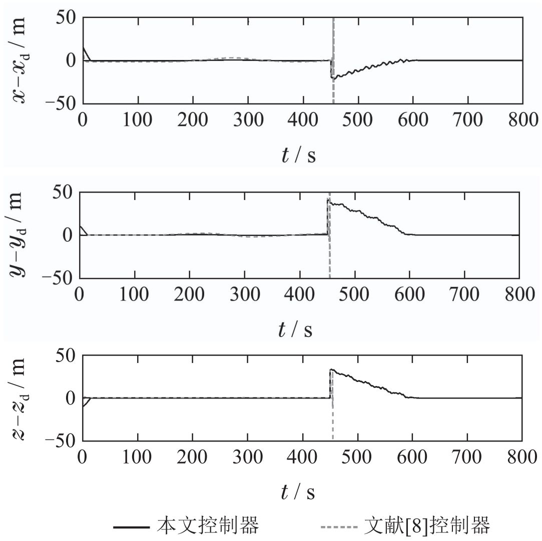
(a) 期望轨迹和实际轨迹



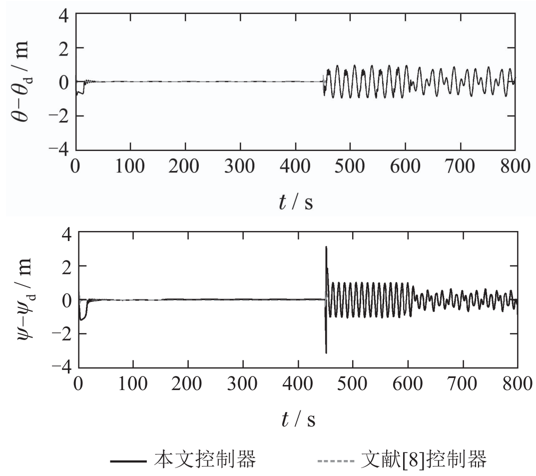
(b) XY 投影图



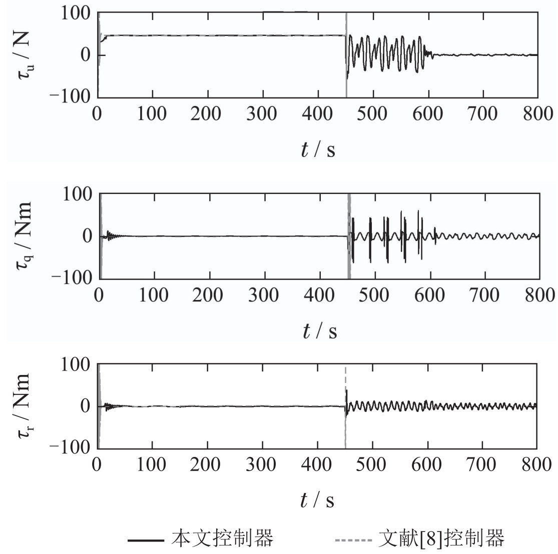
(c) XZ 投影图



(d) 位置误差时间响应



(e) 方向误差时间响应



(f) 控制输入时间响应

图 1 欠驱动AUV三维同步跟踪和镇定仿真结果

Fig. 1 Simulation results for three-dimensional simultaneous tracking and stabilization of the underactuated AUV

6　结论

本文针对欠驱动AUV的三维同步跟踪和镇定控制问题, 提出了一种基于神经网络的饱和控制方法. 通过在角度跟踪误差信号中引入附加控制项, 使得控制器能够在跟踪控制和镇定控制之间进行光滑切换. 基于RBFNN设计了针对AUV未知参数的自适应更新律. 根据Lyapunov直接法, 完成了AUV控制输入的饱和化设计, 保证了跟踪误差能够收敛至零点附近的有界区域内. 最后对AUV三维同步跟踪和镇定问题进行了仿真实验并与已有研究进行了对比, 结果表明本文控制方法无论在跟踪情况下还是镇定情况下均具有较好的控制性能, 并成功避免了输入饱和现象.

参考文献:

[1] BROCKETT R W. *Differential Geometric Control Theory*. Boston, MA: Birkhäuser, 1983.

[2] WU Qi, LI Ye. Stabilization design of underactuated AUV based on quaternion. *CAAI Transaction on Intelligent Systems*, 2014, 9(2): 186 – 191.
(吴琪, 李晔. 基于四元数的欠驱动AUV的镇定控制. 智能系统学报, 2014, 9(2): 186 – 191.)

[3] PETTERSEN K Y, EGELAND O. Time-varying exponential stabilization of the position and attitude of an underactuated autonomous underwater vehicle. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1999, 44(1): 112 – 115.

[4] LI Y M, LI Y, WU Q. Design for three-dimensional stabilization control of underactuated autonomous underwater vehicles. *Ocean Engineering*, 2018, 150: 327 – 336.

[5] LI H, YAN W. Model predictive stabilization of constrained underactuated autonomous underwater vehicles with guaranteed feasibility and stability. *IEEE Transactions on Mechatronics*, 2017, 22(3): 1185 – 1194.

[6] XU Jian, WANG Man, QIAO Lei. Backstepping-based controller for three-dimensional trajectory tracking of underactuated unmaned underwater vehicles. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(11): 1589 – 1596.
(徐健, 汪慢, 乔磊. 欠驱动无人水下航行器三维轨迹跟踪的反步控制. 控制理论与应用, 2014, 31(11): 1589 – 1596.)

[7] LIANG X, QU X, HOU Y, et al. Three-dimensional trajectory tracking control of an underactuated autonomous underwater vehicle based on ocean current observer. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2018, 15(5): 1 – 9.

[8] ZHENG Z W, RUAN L P, ZHU M. Output-constrained tracking control of an underactuated autonomous underwater vehicle with uncertainties. *Ocean Engineering*, 2019, 175: 241 – 250.

[9] ZHOU J, YE D, ZHAO J, et al. Three-dimensional trajectory tracking for underactuated AUVs with bio-inspired velocity regulation. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2018, 10: 282 – 293.

[10] REZAZADEGAN F, SHOJAEI K, SHEIKHOLESLAM F, et al. A novel approach to 6-DOF adaptive trajectory tracking control of an AUV in the presence of parameter uncertainties. *Ocean Engineering*, 2015, 107: 246 – 258.

[11] WANG J Q, WANG C, WEI Y J, et al. Command filter based adaptive neural trajectory tracking control of an underactuated underwater vehicle in three-dimensional space. *Ocean Engineering*, 2019, 180: 175 – 186.

[12] YU H M, GUO C, YAN Z P. Globally finite-time stable three-dimensional trajectory-tracking control of underactuated UUVs. *Ocean Engineering*, 2019, 189: 106 – 329.

[13] DO K D, JIANG Z P, PAN J. Universal controllers for stabilization and tracking of underactuated ships. *Systems & Control Letters*, 2002, 47(4): 299 – 317.

[14] HUANG J, WEN C, WANG W, et al. Adaptive stabilization and tracking control of a nonholonomic mobile robot with input saturation. *Systems & Control Letters*, 2013, 62(3): 234 – 241.

[15] WANG Z, LI G, CHEN X, et al. Simultaneous stabilization and tracking of nonholonomic WMRs with input constraints: Controller design and experimental validation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(7): 5343 – 5352.

[16] WANG Y, MIAO Z, ZHONG H, et al. Simultaneous stabilization and tracking of nonholonomic mobile robots: A Lyapunov-based approach. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2015, 23(4): 1440 – 1450.

[17] BEHAL A, DAWSON D M, DXION W E, et al. Tracking and regulation control of an underactuated surface vessel with nonintegrable dynamics. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2002, 47(3): 495 – 500.

[18] DO K D. Practical control of underactuated ships. *Ocean Engineering*, 2010, 37(13): 1111 – 1119.

[19] HAMEL T, SAMSON C. Transverse function control of a motorboat. *Automatica*, 2016, 65: 132 – 139.

[20] MORIN P, SAMSON C. Practical stabilization of driftless systems on lie groups: The transverse function approach. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, 48(9): 1496 – 1508.

[21] LI J W. Robust tracking control and stabilization of underactuated ships. *Asian Journal of Control*, 2018, 20(6): 2143 – 2153.

[22] LI J W. Robust adaptive control of underactuated ships with input saturation. *International Journal of Control*, 2019: 1 – 15.

[23] FOSSEN T I. *Marine Control Systems: Guidance, Navigation, and Control of Ship, Rigs and Underwater Vehicles*. Trondheim: Marine Cybernetics, 2002.

[24] PARK J, SANDBERG I W. Universal approximation using radial-basis-funtion networks. *Neural Computation*, 1991, 3(2): 246 – 257.

[25] SHOJAEI K. Three-dimensional neural network tracking control of a moving target by underactuated autonomous underwater vehicles. *Neural Computing and Applications*, 2019, 31(2): 509 – 521.

作者简介:

方 凯 硕士研究生, 目前研究方向为欠驱动水下机器人运动控制、非线性控制, E-mail: 953303496@qq.com;

姚佳琪 硕士研究生, 目前研究方向为欠驱动水下机器人运动控制、非线性控制, E-mail: 635833514@qq.com;

李家旺 博士, 副教授, 硕士生导师, 目前研究方向为非完整系统控制、非线性控制、鲁棒控制、自适应控制等, E-mail: lijiawang@nbu.edu.cn.