

DOI:10.11992/tis.201512015

欠驱动 AUV 全局无抖振滑模轨迹跟踪控制

马利民

(中国人民解放军海军驻锦州地区军事代表室,辽宁 锦州 121000)

摘 要:研究了具有控制输入及速度约束的欠驱动自主水下航行器(Autonomous underwater vehicle, AUV)全局轨迹跟踪控制问题。首先,将 AUV 运动学特性线性化,设计虚拟速度及航向角指令,解决传统反步法中速度跳变问题,满足了控制输入及速度约束条件;然后,结合动力学特性,采用自适应无抖振滑模技术,设计了欠驱动 AUV 的全局轨迹跟踪控制器,解决了 Yu 等滑模控制中无法保证航向跟踪控制问题。从工程应用角度出发,有界估计的自适应滑模控制器在 AUV 具有较大参数不确定及未知环境扰动条件下,表现出更好的控制性能。最后,基于 Lyapunov 稳定性理论的完整分析证明及仿真实验,表明了该控制器对系统不确定的鲁棒性,能够实现控制输入及速度约束的欠驱动 AUV 全局轨迹跟踪控制。

关键词:自主水下航行器;全局控制;滑模控制;轨迹跟踪;反步法;自适应;多约束条件;Lyapunov 方法

中图分类号:TP391 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-4785(2016)02-0200-08

中文引用格式:马利民. 欠驱动 AUV 全局无抖振滑模轨迹跟踪控制[J]. 智能系统学报, 2016, 11(2): 200-207.

英文引用格式:MA Limin. Global chattering-free sliding mode trajectory tracking control of underactuated autonomous underwater vehicles[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2016, 11(2): 200-207.

Global chattering-free sliding mode trajectory tracking control of underactuated autonomous underwater vehicles

MA Limin

(Navy Military Representative Office in Jinzhou, Jinzhou 121000, China)

Abstract:To investigate the global trajectory tracking control problem of an underactuated autonomous underwater vehicle (AUV) with control input and velocity constraints, this study first linearized the kinematics to determine the commands of pseudo velocities and yaw angle. These commands solved the speed jump problem in the traditional backstepping method and ensured that the control input and velocity constraints were satisfied. In the second design of the dynamics, an adaptive chattering-free sliding mode technique was used to achieve the global trajectory tracking control of an underactuated AUV, which improved the essential flaws in the work by Yu that cannot guarantee yaw angle tracking. The robust adaptive sliding mode controller with bound estimation achieved enhanced performance for a general class of AUVs in the presence of possibly large parameter uncertainty and unknown environmental disturbances from a practical application viewpoint. Finally, complete stability analysis based on Lyapunov theorem and simulations demonstrated the robustness of the proposed controller to systematical uncertainties, as well as the global tracking ability of underactuated AUVs with control input and velocity constraints.

Keywords: autonomous underwater vehicle; global control; sliding mode control; trajectory tracking; backstepping; adaptive; constraint; Lyapunov method

收稿日期:2015-12-09.

基金项目:国家自然科学基金项目(51179038,51105088).

通信作者:马利民. E-mail:1026809958@qq.com.

随着人类在海洋资源勘探和开发领域的不断加深,使得自主水下航行器(autonomous underwater vehicle, AUV)越来越得到重视,对其运动控制技术的

研究也提出了新的挑战^[1-3]。由于自身重量和经济成本等因素,目前多数 AUV 采用更少推进器来完成多自由度耦合的运动控制,致使其成为典型二阶非完整约束的欠驱动系统^[4]。因此,针对一般类非完整速度约束的系统研究结论并不能直接应用到欠驱动航行器上^[5],尤其是在系统建模参数不准确和存在未知环境扰动条件下,实现欠驱动 AUV 的轨迹跟踪控制更具有理论挑战与工程实际意义。

轨迹跟踪控制要求控制律能够导引 AUV 跟踪一条具有时变特性的参考轨迹,对时间条件具有强约束,因此与航迹点跟踪、路径跟踪控制相比,轨迹跟踪控制更加难以实现^[6]。文献[7]基于 Lyapunov 直接法设计输出反馈控制器,同时实现了欠驱动 AUV 的全局渐近稳定及跟踪控制,但跟踪误差收敛半径依赖于环境扰动且无法通过系统增益进行适当调整,控制器具有较弱的鲁棒性。为解决系统参数不确定和外界扰动问题,鲁棒自适应控制^[8-11]、滑模控制^[12-16]和神经网络^[17-19]等控制方法在水下航行器上得到大量应用。文献[11]分别建立了五自由度和三自由度海流模型,采用反步法和级联系统理论设计控制器,但满意的跟踪效果极大地依赖参考模型,而且实际的设计与调试要比无模型方法复杂得多。文献[16]利用滑模技术对系统参数变化的不敏感特性,将无抖振滑模控制器应用到全驱动 AUV 上,获得了较好的跟踪控制效果,但外界扰动未作考虑,且不能保证系统自适应估计项的有界性。文献[18]利用 DRFNN 设计了六自由度 AUV 的自适应输出反馈控制器,虽然打破了对外界扰动及网络近似误差估计的限制条件,但系统在线自适应参数估计的计算量很大,不利于时变轨迹跟踪控制和实际工程应用。另一方面,反步法^[20-22]在解决欠驱动水下航行器的运动控制问题上也表现出一定优越性。文献[20]利用虚拟速度量代替传统反步法中的姿态角误差变量,避免了控制律设计中的奇异值问题;文献[21]采用仿生模型滤波反步法,解决了较大初始误差条件下速度跳变问题;文献[22]基于二阶滤波反步法增加了系统对噪声的鲁棒性,但以上 3 种方法都未将系统内部参数不确定及外界扰动同时考虑,且自适应估计误差的有界性得不到保证。

通过以上分析,从工程应用角度出发,需要通过严谨且完整的理论分析,设计一种欠驱动 AUV 的轨迹跟踪控制器,满足对系统参数不确定及未知扰动的自适应和鲁棒性。除此之外,欠驱动 AUV 控制性能的实现,不能限制其初始条件、参考轨迹,且满足控制输入及速度约束。为此,本文首先将欠驱动 AUV 运动学特性线性化,设计满足速度约束的虚拟速度及航向角指令,解决了在较大初始误差条件下

速度跳变问题,从而保证得到合理的控制输入,避免推进器饱和。其次,在动力学设计过程中,利用滑模对参数变化不敏感和对扰动具有良好的抑制特性,将文献[23-24]中滑模面加以改进完善,得到新的具有有界估计的自适应无抖振滑模控制器。且由于文献[23-24]中的理论存在一定缺陷,未定义航向角误差和角速度误差,所设计的控制器并不能保证航向角跟踪,本文就此给出了严谨的理论分析和仿真实验验证。仿真结果表明,即使存在较大初始误差、建模参数不准确及未知外界扰动条件下,本文所设计的控制器仍较之前方法具有更好的跟踪控制性能,且保证了控制输入及速度约束,更有利于实际工程应用。

1 欠驱动 AUV 的运动建模

目前,欠驱动 AUV 的轨迹跟踪控制大多解耦为水平面和垂直面运动,且以水平面控制器设计为主。本文考虑欠驱动 AUV 的平面轨迹跟踪控制,且满足如下假设条件:1)忽略由于风、浪、流等外界扰动力引起的纵向、横摇和纵倾运动;2)AUV 的惯性矢量矩阵和水动力阻尼矩阵是对角的,且高阶非线性水动力阻尼项可忽略;3)可用的控制输入仅有纵向力 τ_u 和偏航力矩 τ_r ,即 AUV 仅配备尾部推进器和垂直舵。建立该欠驱动 AUV 的运动学与动力学模型^[25]

1) AUV 运动学模型

$$\begin{cases} \dot{x} = u \cos \psi - v \sin \psi \\ \dot{y} = u \sin \psi + v \cos \psi \\ \dot{\psi} = r \end{cases} \tag{1}$$

2) AUV 动力学模型

$$\begin{cases} \dot{u} = \frac{m_{22}}{m_{11}}vr - \frac{d_{11}}{m_{11}}u + \frac{1}{m_{11}}(\tau_{d1} + \tau_u) \\ \dot{v} = -\frac{m_{11}}{m_{22}}ur - \frac{d_{22}}{m_{22}}v + \frac{1}{m_{22}}\tau_{d2} \\ \dot{r} = -\frac{(m_{22} - m_{11})}{m_{33}}uv - \frac{d_{33}}{m_{33}}r + \frac{1}{m_{33}}(\tau_{d3} + \tau_r) \end{cases} \tag{2}$$

式中: $m_{11} = m - X_{\dot{u}}$, $m_{22} = m - Y_{\dot{v}}$, $m_{33} = I_z - N_{\dot{r}}$, $d_{11} = X_u + X_{|u|u} | \dot{u} |$, $d_{22} = Y_v + Y_{|v|v} | \dot{v} |$, $d_{33} = N_r + N_{|r|r} | \dot{r} |$ 。状态变量 (x, y, ψ) 分别表示航行器在地面坐标系下的位置和航向角; (u, v, r) 分别表示载体坐标系下 AUV 的纵向速度、横向速度和偏航角速度; m 和 $m_{(\cdot)}$ 分别表示 AUV 的惯性质量和包含流体作用下的惯性质量, I_z 为绕 z 轴的转动惯量; $X_{(\cdot)}$ 、 $Y_{(\cdot)}$ 和 $N_{(\cdot)}$ 为粘性流体水动力系数; $d_{(\cdot)}$ 为非线性水动力阻尼项; $\tau_{(\cdot)}$ 和 $\tau_{d(\cdot)}$ 分别为 AUV 的控制

输入和外界扰动力作用在载体坐标系下的分量。考虑到实际航行器的控制输入及速度限制,本文做出如下假设:

假设 1 欠驱动 AUV 的控制输入及速度约束满足: $|\tau_u| \leq \tau_{u\max}$, $|\tau_r| \leq \tau_{r\max}$, $|u| \leq u_{\max}$, $|v| \leq v_{\max}$ 和 $|r| \leq r_{\max}$ 。

2 轨迹跟踪控制器设计

2.1 虚拟参考信号的设计

本文的设计目标是实现欠驱动 AUV 的平面轨迹跟踪控制,可能存在较大的初始误差条件、系统建模不准确及未知外界扰动情况。如何避免常规反步法中,虚拟速度设计直接跟位置误差变量相关,容易引起速度跳变,导致控制器输入饱和,是本节需解决的重点问题。航行器的平面参考轨迹由式(3)产生,即

$$\begin{cases} \dot{x}_d = u_d \cos \psi_d - v_d \sin \psi_d \\ \dot{y}_d = u_d \sin \psi_d + v_d \cos \psi_d \\ \dot{\psi}_d = r_d \end{cases} \quad (3)$$

显然,根据假设 1 的条件,参考轨迹需满足下面的假设,具体论证稍后给出。

假设 2 参考轨迹的速度 u_d 、 v_d 和 r_d 需满足: $|u_d| + |v_d| \leq u_{\max}$ 和 $|r_d| \leq r_{\max}$ 。

首先,定义 AUV 的位姿跟踪误差为

$$x_e = x - x_d, \quad y_e = y - y_d, \quad \psi_e = \psi - \psi_d \quad (4)$$

对位置误差求导,结合式(1)和(3)得到,

$$\begin{cases} \dot{x}_e + k_p \tanh(\bar{k}_p x_e) = X \\ \dot{y}_e + k_p \tanh(\bar{k}_p y_e) = Y \end{cases} \quad (5)$$

式中: k_p 和 \bar{k}_p 均为待设计的正常数,且

$$\begin{aligned} X &= u \cos \psi - v \sin \psi - u_d \cos \psi_d + \\ &\quad v_d \sin \psi_d + k_p \tanh(\bar{k}_p x_e) \\ Y &= u \sin \psi + v \cos \psi - u_d \sin \psi_d - \\ &\quad v_d \cos \psi_d + k_p \tanh(\bar{k}_p y_e) \end{aligned}$$

定义新的误差变量 e_x 和 e_y 为

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi_d & -\sin \psi_d \\ \sin \psi_d & \cos \psi_d \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \quad (6)$$

则 e_x 和 e_y 收敛到零,意味着 x_e 和 y_e 也收敛到零。根据式(6),进一步整理得到

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi_e & -\sin \psi_e \\ \sin \psi_e & \cos \psi_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{X} \\ \bar{Y} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中:

$$\bar{X} = u_d - \cos \psi_d k_p \tanh(\bar{k}_p x_e) -$$

$$\sin \psi_d k_p \tanh(\bar{k}_p y_e)$$

$$\bar{Y} = v_d + \sin \psi_d k_p \tanh(\bar{k}_p x_e) -$$

$$\cos \psi_d k_p \tanh(\bar{k}_p y_e)$$

为得到速度 u 和 v 的虚拟控制量,将式(7)进一步变换,得到,

$$\begin{bmatrix} \cos \psi_e & -\sin \psi_e \\ \sin \psi_e & \cos \psi_e \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u - \bar{X} \cos \psi_e - \bar{Y} \sin \psi_e \\ v + \bar{X} \sin \psi_e - \bar{Y} \cos \psi_e \end{bmatrix} \quad (8)$$

从式(8)可以很容易得到虚拟速度控制量 u_c 和 v_c 如式(9)所示,这也正是文献[23-24]中的控制器设计思路。虽然位置跟踪可以实现,但航向跟踪并不能保证,例如跟踪控制出现反向,这一点在本文仿真对比实验中得到进一步验证。所以,本文采用纵向速度 u_c 和航向角 ψ_c 作为虚拟控制量,从动力学模型(2)可以看出,这样设计控制器可以更好地实现位置与航向跟踪控制。

虚拟速度控制量设计为

$$\begin{aligned} u_c &= \cos \psi_{ec} \bar{X} + \sin \psi_{ec} \bar{Y} \\ v_c &= -\sin \psi_{ec} \bar{X} + \cos \psi_{ec} \bar{Y} \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $\psi_{ec} = \psi_c - \psi_d$ 。为得到航向角 ψ_c 的控制设计,可根据式(7),令 e_x 和 e_y 都为零,先得到航向角误差虚量:

$$\psi_{ec} = \theta - \varphi \text{ 或 } \psi_{ec} = \pi + \theta - \varphi \quad (10)$$

式中: $\theta = \arctan(\bar{Y}/\bar{X})$ 和 $\varphi = \arctan(v/u)$ 。当期望速度 u_d 为正值时, $\psi_{ec} = \theta - \varphi$; 当 u_d 为负值时, $\psi_{ec} = \pi + \theta - \varphi$ 。至此,虚拟速度控制量 u_c 和航向角 ψ_c 总结为

$$\begin{aligned} u_c &= \cos \psi_{ec} \bar{X} + \sin \psi_{ec} \bar{Y} \\ \psi_c &= \psi_{ec} + \psi_d \end{aligned} \quad (11)$$

通过上述分析可知,当 $u = u_c$ 和 $\psi = \psi_c$,即可实现位置与航向跟踪控制。

2.2 滑模控制器设计

接下来,需要设计控制器 τ_u 和 τ_r 实现速度 u 和航向角 ψ 分别跟踪虚拟参考信号 u_c 和 ψ_c 。根据上述分析,需要对文献[23-24]中滑模面设计加以改进完善,首先考虑纵向速度控制,取滑模面 S_1 为

$$S_1 = \dot{u}_e + \lambda_1 u_e + \lambda_2 \int u_e \quad (12)$$

式中: $u_e = u - u_c$, λ_1 为正常数。对式(12)求导:

$$\dot{S}_1 =$$

$$\ddot{u}_e + \frac{\lambda_1}{m_{11}}(m_{22}vr - d_{11}u + \tau_{d1} + \tau_u - m_{11}\dot{u}_c) + \lambda_2 u_e$$

考虑到系统建模不准确,可能引起控制器性能极度下降,定义系统不确定项 f_1 为

$$f_1 = (m_{11} - \hat{m}_{11})(\dot{u}_e - \frac{\ddot{u}_e}{\lambda_1} - \frac{\lambda_2}{\lambda_1}u_e) - (m_{22} - \hat{m}_{22})vr + (d_{11} - \hat{d}_{11})u \quad (13)$$

控制器 τ_u 设计为

$$\tau_u = \hat{m}_{11}(\dot{u}_e - \frac{\ddot{u}_e}{\lambda_1} - \frac{\lambda_2}{\lambda_1}u_e) - \hat{m}_{22}vr + \hat{d}_{11}u + \hat{f}_1 - k_1S_1 - B_1 \quad (14)$$

式中:考虑到计算 \ddot{u}_e 的复杂性,采用反馈控制量 $\ddot{u}_e = -k_u\dot{u}_e$ 。 \hat{f}_1 为不确定项 f_1 的估计值, k_1 为正常数, $B_i(i=1,2)$ 为鲁棒项,定义为

$$B_i = \begin{cases} \hat{\delta}_i \frac{S_i}{|S_i|}, & S_i \neq 0 \\ 0, & S_i = 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\hat{\delta}_1$ 为有界扰动 δ_1 的估计值,即 $|\tau_{d1}| \leq \delta_1$ 。设计的控制器自适应律为

$$\begin{aligned} \dot{\hat{f}}_1 &= -\Gamma_{f_1}S_1 - \sigma_{f_1}\Gamma_{f_1}\hat{f}_1 \\ \dot{\hat{\delta}}_1 &= \Gamma_{\delta_1}|S_1| - \sigma_{\delta_1}\Gamma_{\delta_1}\hat{\delta}_1 \end{aligned} \quad (16)$$

式中: Γ_{f_1} 、 Γ_{δ_1} 为待设计正常数。 σ_{f_i} 、 $\sigma_{\delta_i}(i=1,2)$ 为控制器切换参数:

$$\sigma_{f_i} = \begin{cases} 0, & |f_i| \leq N_{f_0} \\ \sigma_{f_0}(\frac{|f_i|}{N_{f_0}} - 1), & N_{f_0} \leq |f_i| \leq 2N_{f_0} \\ \sigma_{f_0}, & |f_i| \geq 2N_{f_0} \end{cases}$$

$$\sigma_{\delta_i} = \begin{cases} 0, & |\delta_i| \leq N_{\delta_0} \\ \sigma_{\delta_0}(\frac{|\delta_i|}{N_{\delta_0}} - 1), & N_{\delta_0} \leq |\delta_i| \leq 2N_{\delta_0} \\ \sigma_{\delta_0}, & |\delta_i| \geq 2N_{\delta_0} \end{cases} \quad (17)$$

式中: N_{f_0} 、 N_{δ_0} 、 σ_{f_0} 和 σ_{δ_0} 均为正常数。下面验证控制器 τ_u 能够实现纵向速度控制。选取 Lyapunov 函数为

$$V_1 = \frac{1}{2\lambda_1}m_{11}S_1^2 + \frac{1}{2}\Gamma_{f_1}^{-1}\tilde{f}_1^2 + \frac{1}{2}\Gamma_{\delta_1}^{-1}\tilde{\delta}_1^2 \quad (18)$$

式中: $\tilde{f}_1 = f_1 - \hat{f}_1$, $\tilde{\delta}_1 = \delta_1 - \hat{\delta}_1$ 。对式(8)求导得到:

$$\dot{V}_1 \leq -k_1S_1^2 + \sigma_{f_1}\tilde{f}_1\dot{\hat{f}}_1 + \sigma_{\delta_1}\tilde{\delta}_1\dot{\hat{\delta}}_1 \quad (19)$$

因此,纵向速度跟踪误差和自适应估计误差将渐近收敛到原点附近的一个小的邻域内。具体理论分析证明将在下面的稳定性分析中给出。

然后,考虑航向角和角速度跟踪控制,取滑模面

S_2 为

$$S_2 = r_e + e_\psi + \lambda_3 \int (r_e + e_\psi) \quad (20)$$

式中: $r_e = r - r_d$, $e_\psi = \psi - \psi_c = \psi_e - \psi_{ec}$, λ_3 为正常数。同样,对式(20)求导,得到

$$\dot{S}_2 = \frac{1}{m_{33}}[(m_{11} - m_{22})uv - d_{33}r + \tau_{d3} + \tau_r - m_{33}\dot{r}_d] + \dot{e}_\psi + \lambda_3(r_e + e_\psi) \quad (21)$$

定义系统不确定项 f_2 为

$$f_2 = (m_{33} - \hat{m}_{33})(\dot{r}_d - \dot{e}_\psi - \lambda_3(r_e + e_\psi)) - (m_{11} - m_{22} - \hat{m}_{11} + \hat{m}_{22})uv + (d_{33} - \hat{d}_{33})r \quad (22)$$

控制器 τ_r 设计为

$$\tau_r = \hat{m}_{33}[\dot{r}_d - \dot{e}_\psi - \lambda_3(r_e + e_\psi)] - (\hat{m}_{11} - \hat{m}_{22})uv + \hat{d}_{33}r + \hat{f}_2 - k_2S_2 - B_2 \quad (23)$$

式中: \hat{f}_2 为不确定项 f_2 的估计值, k_2 为待设计的正常数, B_2 为鲁棒项,定义如式(15)。 $\hat{\delta}_2$ 为有界扰动 δ_2 的估计值,即 $|\tau_{d3}| \leq \delta_2$ 。设计控制器自适应律为

$$\begin{aligned} \dot{\hat{f}}_2 &= -\Gamma_{f_2}S_2 - \sigma_{f_2}\Gamma_{f_2}\hat{f}_2 \\ \dot{\hat{\delta}}_2 &= \Gamma_{\delta_2}|S_2| - \sigma_{\delta_2}\Gamma_{\delta_2}\hat{\delta}_2 \end{aligned} \quad (24)$$

式中: Γ_{f_2} 和 Γ_{δ_2} 为待设计的正常数,控制器切换参数如式(17)中定义。下面进一步验证控制器 τ_r 能够实现航向角及角速度跟踪控制,选取 Lyapunov 函数为

$$V_2 = \frac{1}{2}m_{33}S_2^2 + \frac{1}{2}\Gamma_{f_2}^{-1}\tilde{f}_2^2 + \frac{1}{2}\Gamma_{\delta_2}^{-1}\tilde{\delta}_2^2 \quad (25)$$

式中: $\tilde{f}_2 = f_2 - \hat{f}_2$, $\tilde{\delta}_2 = \delta_2 - \hat{\delta}_2$ 。对式(25)求导,得到

$$\dot{V}_2 \leq -k_2S_2^2 + \sigma_{f_2}\tilde{f}_2\dot{\hat{f}}_2 + \sigma_{\delta_2}\tilde{\delta}_2\dot{\hat{\delta}}_2 \quad (26)$$

因此,航向角和角速度跟踪误差都将收敛到原点附近的一个小的邻域。

3 稳定性分析

定理 1 对给定 AUV 参考轨迹如式(3),满足假设条件 1 和 2,虚拟控制量如式(11),控制器设计如式(14)和(23),自适应律为(16)和(24),以及鲁棒控制采用式(15)和(17),通过合理的选择控制器参数 k_p 、 \bar{k}_p 、 k_1 、 k_2 、 k_u 、 Γ_{f_1} 、 Γ_{f_2} 、 Γ_{δ_1} 、 Γ_{δ_2} 、 σ_{f_1} 、 σ_{f_2} 、 σ_{δ_1} 和 σ_{δ_2} 、实现欠驱动 AUV 轨迹跟踪误差的全局一致最终有界,且满足控制输入及速度约束条件。

证明 首先,给出速度跟踪误差的收敛性证明。根据上述控制器设计分析,构造 Lyapunov 函数 $V_3 = V_1 + V_2$,对其求导,得到

$$\dot{V}_3 = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 \leq$$

$$-k_1 S_1^2 - k_2 S_2^2 + \sum_{i=1,2} (\sigma_{f_i} \tilde{f}_i \hat{f}_i + \sigma_{\delta_i} \tilde{\delta}_i \hat{\delta}_i) \quad (27)$$

利用表达式

$$\begin{aligned} \sigma_{f_i} \hat{f}_i \tilde{f}_i &= \sigma_{f_i} \tilde{f}_i (f_i - \tilde{f}_i) \leq \\ &= -\sigma_{f_i} \tilde{f}_i^2 + \sigma_{f_i} \left(\frac{\tilde{f}_i^2 + f_i^2}{2} \right) \leq \\ &= -\frac{1}{2} \sigma_{f_i} \tilde{f}_i^2 + \frac{1}{2} \sigma_{f_i} f_i^2 \\ \sigma_{\delta_i} \delta_i^T \hat{\delta}_i &= \sigma_{\delta_i} \tilde{\delta}_i^T (\delta_i - \tilde{\delta}_i) \leq \\ &= -\sigma_{\delta_i} \tilde{\delta}_i^2 + \sigma_{\delta_i} \left(\frac{\tilde{\delta}_i^2 + \delta_i^2}{2} \right) \leq \\ &= -\frac{1}{2} \sigma_{\delta_i} \tilde{\delta}_i^2 + \frac{1}{2} \sigma_{\delta_i} \delta_i^2 \end{aligned} \quad (28)$$

根据式(17),可知

$$\begin{aligned} \sigma_{f_i} f_i^2 &\leq 4\sigma_{f_0} N_{f_0} + \sigma_{f_0} f_i^2 \\ \sigma_{\delta_i} \delta_i^2 &\leq 4\sigma_{\delta_0} N_{\delta_0} + \sigma_{\delta_0} \delta_i^2 \end{aligned} \quad (29)$$

结合式(28)和(29),对式(27)整理得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &\leq -k_1 S_1^2 - k_2 S_2^2 - \frac{1}{2} \sum_{i=1,2} (\sigma_{f_i} \tilde{f}_i^2 + \sigma_{\delta_i} \tilde{\delta}_i^2) + \\ &\sum_{i=1,2} (\sigma_{f_0} f_i^2 + \sigma_{\delta_0} \delta_i^2) + 4\sigma_{\beta_0} N_{f_0} + 4\sigma_{\delta_0} N_{\delta_0} \leq \\ &= -\mu V_3 + C \\ \mu &= \min \left\{ 2k_1 \lambda_1, 2k_2, \frac{\sigma_{f_i}}{\lambda_{\max}(\Gamma_{f_i}^{-1})}, \frac{\sigma_{\delta_i}}{\lambda_{\max}(\Gamma_{\delta_i}^{-1})} \right\} \\ C &= 4\sigma_{f_0} N_{f_0} + 4\sigma_{\delta_0} N_{\delta_0} + \sum_{i=1,2} (\sigma_{f_0} f_i^2 + \sigma_{\delta_0} \delta_i^2) \end{aligned} \quad (30)$$

对式(30)进一步整理得到

$$0 \leq V_3(t) \leq V_3(0) e^{-\mu t} + C/\mu \quad (31)$$

因此,系统的速度跟踪误差、航向角跟踪误差以及自适应估计误差均收敛到原点附近的一个小的邻域内,且收敛半径可通过适当增大式(30)中的增益值 μ 来减小。

接下来,进一步验证速度跟踪控制量的有界性及横向速度 v 跟踪误差的收敛性。

1)速度 u 的有界性:根据上述分析,速度 u 在控制器 τ_u 下可实现速度跟踪,即 $u = u_c$,所以虚拟速度控制量 u_c 有界,即可保证速度 u 的有界性。根据式(11)得到,

$$\begin{aligned} |u_c| &= |\cos \psi_{ec} \bar{X} + \sin \psi_{ec} \bar{Y}| \leq \\ &= |u_d| + |v_d| + \sqrt{2} k_p \end{aligned} \quad (32)$$

根据假设1, $|u_c| \leq u_{\max}$,所以控制参数 k_p 应满足 $0 < k_p \leq k_{p\max} = \frac{u_{\max} - |u_d| - |v_d|}{\sqrt{2}}$,保证了虚拟速度控制量 u_c 的有界性,同时也验证了假设条件2。

2)速度 r 的有界性:根据控制器设计,角速度 r 在控制器 τ_r 下可实现速度跟踪,即 $r = r_d$,而参考轨迹是有界的,所以角速度 r 有界。

3)速度 v 的有界性:根据AUV动力学模型(2),速度 u 、 r 和扰动项 τ_{d2} 均有界,所以速度 v 有界。

4)横向速度跟踪误差 v_e 的收敛性:定义横向速度误差 $v_e = v - v_c$ 。根据虚拟控制量航向角 $\psi_{ec} = \theta - \varphi$,或 $\psi_{ec} = \pi + \theta - \varphi$ 可知:

$$\tan \psi_{ec} = \frac{\bar{Y}u - \bar{X}v}{\bar{X}u + \bar{Y}v} \quad (33)$$

进一步整理,得

$$v = v_c + T_u u_e \quad (34)$$

式中: $T_u = \frac{\cos \psi_{ec} \bar{Y} - \sin \psi_{ec} \bar{X}}{\cos \psi_{ec} \bar{X} + \sin \psi_{ec} \bar{Y}}$ 。所以为了保证横向速度误差 v_e 收敛,主要验证 T_u 是否有界。而根据非线性理论, T_u 的有界性可根据两点保证:1) $T_u u_e$ 有界;2)当 $u_e = 0$ 时, $T_u u_e = 0$ 。第一点可由 v 和 v_c 有界,根据式(34)保证 $T_u u_e$ 有界;针对第二点,已知 $u_e = 0$ 和 $e_\psi = 0$,则式(8)等于零,即横向速度 $v = v_c$,再结合式(34)可知, $T_u u_e = 0$ 。综上所述, T_u 有界, $v_e = T_u u_e$ 保证了横向速度误差的收敛性。

最后,验证位置跟踪误差的收敛性。针对外环控制系统,我们假设速度控制环已完成很好跟踪效果,即 $u = u_c$, $v = v_c$ 和 $r = r_d$,且 $e_\psi = 0$,即 $\psi_e = \psi_{ec}$ 。根据位置误差定义

$$\begin{aligned} \dot{x}_e &= \dot{x} - \dot{x}_d = \\ &= u \cos \psi - v \sin \psi - u_d \cos \psi_d + v_d \sin \psi_d = \\ &= (\cos \psi_e \bar{X} + \sin \psi_e \bar{Y}) \cos \psi - (-\sin \psi_e \bar{X} + \\ &\quad \cos \psi_e \bar{Y}) \sin \psi - u_d \cos \psi_d + v_d \sin \psi_d = \\ &= -k_p \tanh(\bar{k}_p x_e) \\ y_e &= \dot{y} - \dot{y}_d = \\ &= u \sin \psi + v \cos \psi - u_d \sin \psi_d - v_d \cos \psi_d = \\ &= (\cos \psi_e \bar{X} + \sin \psi_e \bar{Y}) \sin \psi + (-\sin \psi_e \bar{X} + \\ &\quad \cos \psi_e \bar{Y}) \cos \psi - u_d \sin \psi_d - v_d \cos \psi_d = \\ &= -k_p \tanh(\bar{k}_p y_e) \end{aligned}$$

所以,位置跟踪控制误差 x_e 和 y_e 均收敛到零。

而航向跟踪误差 $\psi_e = \int r_e$,根据滑模面 S_2 的设计,可以保证收敛到零,同时 $\psi_{ec} = \psi_e - e_\psi$ 也收敛到零。再结合式(11),可知虚拟速度量 u_c 和 v_c 分别收敛到 u_d 和 v_d 。综上所述,本文给出了完整且严谨的轨迹跟

踪控制系统稳定性分析证明,保证了跟踪误差的全局一致最终有界。

4 仿真实验结果与分析

为验证本文所提出的控制器性能,采用文献[27]中的欠驱动 AUV 模型作为实验对象。模型参数为: $m_{11} = 215 \text{ kg}$, $m_{22} = 265 \text{ kg}$, $m_{33} = 80 \text{ kgm}^2$, $d_{11} = 70 + 100|u|, \text{kg/s}$, $d_{22} = 100 + 200|v|, \text{kg/s}$, $d_{33} = 50 + 100|r|, \text{kgm}^2/\text{s}$ 。仿真实验包括如下两种: 1) 圆形轨迹跟踪 $x_d = 100\sin(0.01t)$, $y_d = 100\cos(0.01t)$; 2) 正弦轨迹跟踪 $x_d = t$, $y_d = 100\sin(0.01t)$ 。两种控制方案中都存在较大初始误差,初始速度 $(u(0), v(0), r(0)) = (0, 0, 0)$, 且控制输入和速度约束条件为 $\tau_{u\max} = 1\,000 \text{ N}$, $\tau_{r\max} = 1\,000 \text{ Nm}$, $u_{\max} = 5 \text{ m/s}$, $v_{\max} = 3 \text{ m/s}$, $r_{\max} = 2 \text{ rad/s}$ 。为满足上述约束条件,选取控制器参数为 $k_p = 1$, $\bar{k}_p = 0.1$, $\lambda_1 = 2$, $\lambda_2 = 1$, $\lambda_3 = 1$, $k_1 = 100$, $k_2 = 50$, $k_u = 1$, $\Gamma_{f_i} = 20$, $\Gamma_{\delta_i} = 10$, $\sigma_{f_0} = 0.01$, $\sigma_{\delta_0} = 0.01$ 。

为更好验证控制器的鲁棒性,假设系统存在 10% 的建模误差,即仿真中对名义模型参数同时增加 10% 作为实际参数。且采用同文献[26]中相似的方式产生随机扰动力,即 $\tau_{di} = 0.1m_{ii}\text{rand}(\cdot)$, $i = 1, 2, 3$, 其中 $\text{rand}(\cdot)$ 为高斯随机噪声,取值区间为 $[0, 1]$, 然后分别作用在 AUV 动力学模型(2)中各自由度上。为了更好地说明本文控制器不仅能在较大初始误差条件,系统参数不准确及未知外界扰动下具有良好的跟踪控制性能,还能解决文献[23-24]中无法实现航向跟踪控制问题。对文献[24]中的控制器采用同样上述约束条件进行对比实验仿真验证。

图 1 给出了欠驱动 AUV 在两种控制方法下实现圆形轨迹跟踪控制的实验结果。

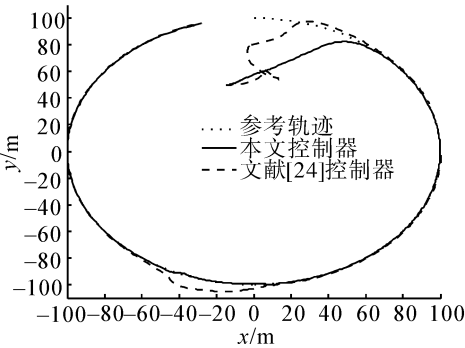


图 1 圆形轨迹跟踪
Fig.1 Circular trajectory-tracking

从图 1~4 中可以看出,虽然欠驱动 AUV 具有较大的初始误差条件、建模不准确、未知随机扰动以及控制输入和速度约束,但相比文献[24]的控制方法,本文所提出的控制器明显具有更佳控制效果。

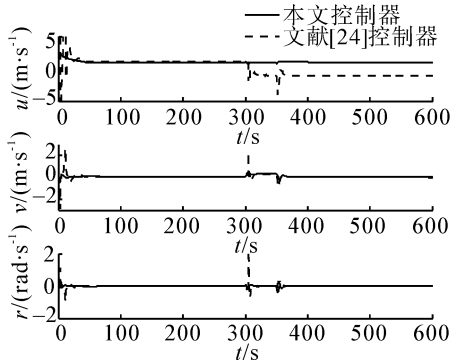


图 2 位置和航向跟踪误差
Fig.2 Tracking errors of position and orientation

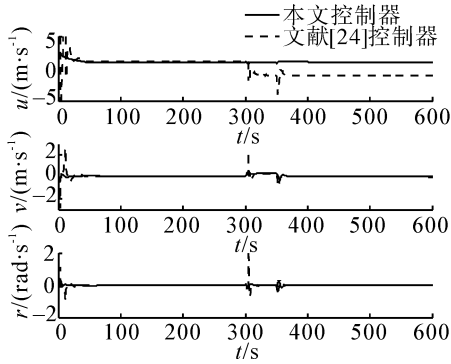


图 3 速度跟踪响应曲线
Fig.3 Response curves of velocity-tracking

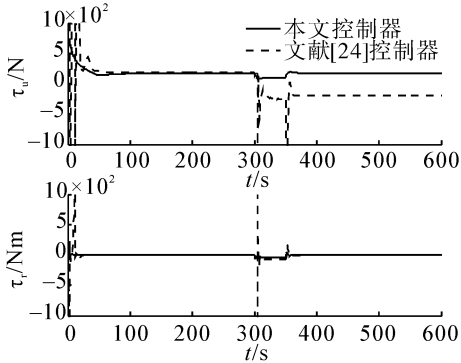


图 4 控制输入响应曲线
Fig.4 Response curves of control inputs

位置和航向跟踪误差充分小且收敛更加平滑、速度更快,此外,本文在初始误差较大情况下,速度跟踪并未出现文献[24]中的速度跳变现象,避免了控制输入饱和。为更好验证控制器的鲁棒性,在仿真时间 300~350 s 的时间段,额外 50 N 的定常扰动作用到 AUV 的三自由度运动学模型上。很明显之前方法在没有控制输入和速度约束下能够实现轨迹跟踪控制,但遭受重大扰动后,跟踪控制性能极度下降,甚至航

向跟踪出现反向,导致纵向速度出现负值,即倒退行进,这并不符合轨迹跟踪控制要求。总之,以上跟踪控制结果充分体现了本文控制器的有效性和鲁棒性。

图 5 为欠驱动 AUV 跟踪具有时变速度的正弦曲线。同样在具有较大初始误差条件下,本文控制器的跟踪控制效果,较文献[24]中方法相比,明显具有更好的动态响应和足够充分小的跟踪误差,如图 6~8。

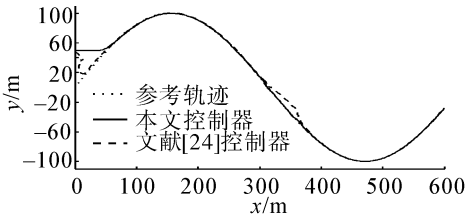


图 5 正弦轨迹跟踪

Fig.5 Sinusoidal trajectory-tracking

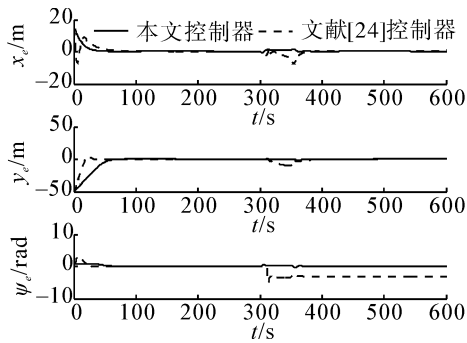


图 6 位置和航向跟踪误差

Fig.6 Tracking errors of position and orientation

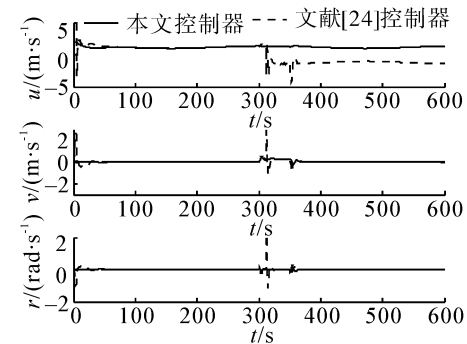


图 7 速度跟踪响应曲线

Fig.7 Response curves of velocity-tracking

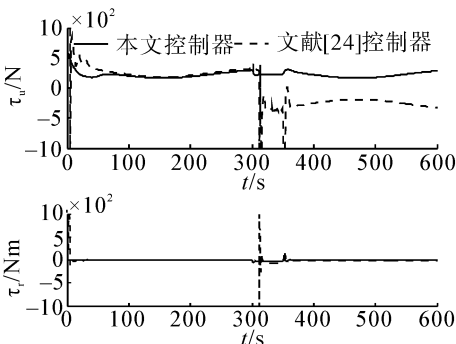


图 8 控制输入响应曲线

Fig.8 Response curves of control inputs

即使在 300~350 s 出现重大未知扰动,但位姿和速度跟踪响应平滑,未出现速度跳变和推进器饱和,充分体现了该控制器的强鲁棒性。而之前文献中未对航行器航向跟踪控制给出理论分析设计,无法保证航向跟踪控制,在该实验中得到充分论证。以上跟踪控制实验结果,充分体现了欠驱动 AUV 即使存在较大初始误差、系统模型不准确、未知外界扰动以及控制输入和速度约束情况,本文控制器仍然能够实现全局轨迹跟踪控制,满足实际工程应用需求。

5 结束语

本文针对欠驱动 AUV 存在较大初始误差、系统建模参数不准确、未知外界扰动以及控制输入和速度约束等问题,采用类似反步法设计过程,提出具有有界自适应估计的无抖振滑模控制器,解决了常规反步法中因大初始误差引起速度跳变问题,避免了推进器饱和,满足了控制输入和速度约束条件。而且,针对文献[24]中滑模控制器无法保证航向跟踪控制的缺陷,设计了高阶积分滑模面,实现了跟踪误差控制系统的全局一致有界性。最后,基于 Lyapunov 稳定性理论给出了完整且严谨的理论分析证明,并在仿真对比实验中进行验证,充分体现了本文控制器的有效性和强鲁棒性,能更好地适用于实际工程应用,但本文仅设计了平面控制器,未来工作需进一步扩展到欠驱动 AUV 的三维空间轨迹跟踪控制。

参考文献:

[1] BIAN Xinqian, YAN Zheping, CHEN Tao, et al. Mission management and control of BSA-AUV for ocean survey[J]. Ocean engineering, 2012, 55: 161-174.

[2] 徐玉如, 肖坤. 智能海洋机器人技术进展[J]. 自动化学报, 2007, 33(5): 518-521.

XU Yuru, XIAO Kun. Technology development of autonomous ocean vehicle[J]. Acta automatica sinica, 2007, 33 (5): 518-521.

[3] 王奎民. 主要海洋环境因素对水下航行器航行影响分析[J]. 智能系统学报, 2015, 10(2): 316-323.

WANG Kuimin. Influence of main ocean environments on the navigation of underwater vehicles[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2015, 10(2): 316-323.

[4] REYHANNOGLU M, VAN DER SCHAFT A, MCCLAMROCH N H, et al. Dynamics and control of a class of underactuated mechanical systems[J]. IEEE transactions on automatic control, 1999, 44(9): 1663-1671.

[5] REYHANNOGLU M. Exponential stabilization of an underactuated autonomous surface vessel[J]. Automatica, 1997, 33 (12): 2249-2254.

[6] AGUIAR A P, HESPANHA J P. Trajectory tracking and path following of underactuated autonomous vehicles with

- parametric modeling uncertainty[J]. IEEE transactions on automatic control, 2007, 52(8): 1362-1379.
- [7] DO K D, JIANG Z P, PAN J, et al. A global output-feedback controller for stabilization and tracking of underactuated ODIN: a spherical underwater vehicle[J]. Automatica, 2004, 40(1): 117-124.
- [8] ANTONELLI G, CHIAVERINI S, SARKAR N, et al. Adaptive control of an autonomous underwater vehicle: experimental results on ODIN[J]. IEEE transactions on control systems technology, 2001, 9(5): 756-765.
- [9] KUMAR R P, DASGUPATA A, KUMAR C S. Robust trajectory control of underwater vehicles using time delay control law[J]. Ocean engineering, 2007, 34(5/6): 842-849.
- [10] ANTONELLI G. On the use of adaptive/integral actions for six-degrees-of-freedom control of autonomous underwater vehicles[J]. IEEE journal of oceanic engineering, 32(2): 300-312.
- [11] REFSNES J E, ASGEIR J S, PETTERSEN K Y. 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.
- [12] PISANO A, USAI E. Output-feedback control of an underwater vehicle prototype by higher-order sliding modes[J]. Automatica, 2004, 40(9): 1525-1531.
- [13] SOYLU S, BUCKHAM B J, RON P P. A chattering-free sliding-mode controller for underwater vehicles with fault-tolerant infinity-norm thrust allocation[J]. Ocean engineering, 2008, 35(16): 1647-1659.
- [14] 贾鹤鸣, 程相勤, 张利军, 等. 基于离散滑模预测的欠驱动 AUV 三维航迹跟踪控制[J]. 控制与决策, 2011, 26(10): 1452-1458.
JIA Heming, CHENG Xiangqin, ZHANG Lijun, et al. Three-dimensional path tracking control for an underactuated AUV based on discrete-time sliding mode prediction[J]. Control and decision, 2011, 26(10): 1452-1458.
- [15] 贾鹤鸣, 张利军, 程相勤, 等. 基于非线性迭代滑模的欠驱动 UUV 三维航迹跟踪控制[J]. 自动化学报, 2012, 38(2): 308-313.
JIA Heming, ZHANG Lijun, CHENG Xiangqin, et al. Three-dimensional path following control for an underactuated UUV based on nonlinear iterative sliding mode[J]. Acta automatica sinica, 2012, 38(2): 308-313.
- [16] ZHU Daqi, SUN Bing. The bio-inspired model based hybrid sliding-mode tracking control for unmanned underwater vehicles[J]. Engineering applications of artificial intelligence, 2013, 26(10): 2260-2269.
- [17] 俞建成, 张艾群, 王晓辉, 等. 基于模糊神经网络水下机器人直接自适应控制[J]. 自动化学报, 2007, 33(8): 840-846.
YU Jiancheng, ZHANG Aiqun, WANG Xiaohui, et al. Direct adaptive control of underwater vehicles based on fuzzy neural networks[J]. Acta automatica sinica, 2007, 33(8): 840-846.
- [18] ZHANG Lijun, QI Xue, PANG Yongjie. Adaptive output feedback control based on DRFNN for AUV[J]. Ocean engineering, 2009, 36(9/10): 716-722.
- [19] 夏国清, 杨莹, 赵为光. 欠驱动 AUV 模糊神经网络 L_2 增益鲁棒跟踪控制[J]. 控制与决策, 2013, 28(3): 351-356.
XIA Guoqing, YANG Ying, ZHAO Weiguang. FNN-based L_2 following control of underactuated autonomous underwater vehicles[J]. Control and decision, 2013, 28(3): 351-356.
- [20] 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[J]. 控制理论与应用, 2014, 31(11): 1589-1596.
XU Jian, WANG Man, QIAO Lei. Backstepping-based controller for three-dimensional trajectory tracking of underactuated unmanned underwater vehicle[J]. Control theory and applications, 2014, 31(11): 1589-1596.
- [21] SUN Bing, ZHU Daqi, YANG S X. A bioinspired filtered backstepping tracking control of 7000-m manned submarine vehicle[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2014, 61(7): 3682-3693.
- [22] 王宏建, 陈子印, 贾鹤鸣, 等. 基于滤波反步法的欠驱动 AUV 三维路径跟踪控制[J]. 自动化学报, 2015, 41(3): 631-645.
WANG Hongjian, CHEN Ziyin, JIA Heming, et al. Three-dimensional path-following control of underactuated autonomous underwater vehicle with command filtered backstepping[J]. Acta automatica sinica, 2015, 41(3): 631-645.
- [23] ASHRAFIUN H, MUSKE K R, MCNINCH L C, et al. Sliding mode tracking control of surface vessels[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2008, 55(11): 4004-4012.
- [24] YU R, ZHU Q, XIA G, et al. Sliding mode tracking control of an underactuated surface vessel[J]. IET control theory and applications, 2012, 6(3): 461-466.
- [25] FOSSEN T I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control[M]. New York: Wiley, 2011.
- [26] CHWA D. Global tracking control of underactuated ships with input and velocity constraints using dynamic surface control method[J]. IEEE transactions on control systems technology, 2011, 19(6): 1357-1370.
- [27] PETTERSEN K Y, EGELAND O. Time-varying exponential stabilization of the position and attitude of an underactuated autonomous underwater vehicle[J]. IEEE transactions on automatic control, 1999, 44(1): 112-115.

作者简介:



马利民,男,1978年生,主要研究方向为水下航行器的导航、制导与控制。