

欠驱动 UUV 级联自适应目标跟踪控制方法研究^①

王宏健^{②*} 徐金龙^{③*} 张爱华^{**}

(* 哈尔滨工程大学自动化学院 哈尔滨 150001)

(** 上海工程技术大学机械工程学院 上海 201620)

摘 要 研究了欠驱动水下航行器(UUV)目标跟踪控制算法的设计,基于 UUV 数学模型,设计了一种能够保证系统全局渐进稳定的新型级联自适应目标跟踪控制算法。与通用欠驱动 UUV 跟踪控制算法的设计不同,该设计考虑了水动力阻尼矩阵中非对角线上元素对控制系统的影响,通过对运动学子系统的虚拟控制来获得欠驱动 UUV 的纵向期望速度,并结合反步法与李雅普诺夫稳定性分析得到动力学子系统的自适应反步控制律,利用自适应项估计海流产生的慢变环境干扰,进而通过将目标跟踪系统整理成由运动学控制和动力学控制构成的非线性级联系统,为欠驱动 UUV 目标跟踪提出了一种级联自适应控制算法。应用级联理论证明了整个闭环控制系统的稳定性,并通过仿真验证了该方法的有效性。

关键词 欠驱动水下航行器(UUV),级联系统,目标跟踪,自适应控制

0 引 言

近年来,无人水下航行器(unmanned underwater vehicle, UUV)被广泛应用于海洋环境勘探和资源开发中。设计时出于负载能力和航行经济性的考虑,UUV 系统在横向和垂向上未装配辅助推进器,无直接控制输入,使得系统的控制输入维数小于其运动自由度的数目,成为欠驱动系统。Brockett 定理表明,不存在任何连续时不变反馈控制律实现对欠驱动系统的稳定控制,因此欠驱动系统控制问题研究的难点在于如何通过维数较小的输入控制维数较多的广义坐标空间内的运动。在水下作业任务中,UUV 的跟踪控制是其自动驾控系统的不可或缺的一项关键控制技术,该技术能够保证 UUV 沿预定或规划航线航行,因而已广泛用于海底地形地貌测量、海底管道检测、区域搜索等作业任务中,包括轨迹跟踪、路径跟踪和目标跟踪。良好的跟踪控制方法是其顺利完成作业任务的重要技术前提。本文研

究了欠驱动 UUV 的目标跟踪控制问题,提出了一种基于非线性数学模型的级联自适应目标跟踪控制算法,并通过仿真实验验证了其有效性。

1 相关工作

目前对 UUV 跟踪控制的研究,多数是针对欠驱动 UUV 控制系统的非完整性进行的。根据给定期望路径是否为时间的显函数,UUV 跟踪可划分为轨迹跟踪问题和路径跟踪问题:前者要求 UUV 跟踪一条以时间参数刻画的空间曲线或沿预定时间规则运动的虚拟 UUV;后者不受时间条件约束,只要求 UUV 收敛到期望路径,而对何时到达何地并无严格要求。近年来,随着船舶与水下技术的发展,水面船舶或 UUV 针对水下目标(包括动、静态目标)的跟踪问题日益引起国内外学者的关注。由于跟踪过程中一般仅已知目标的瞬时运动信息而无法预知其未来运动情况^[1],这就需要 UUV 根据目标运动情况(静止或运动)实时地调整自身位姿实施实时目

① 国家自然科学基金(E091002/50979017),教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20092304110008),中央高校基本科研业务费专项资金(HEUCFZ1026),哈尔滨市科技创新人才(优秀学科带头人)研究专项资金(2012RFXXG083)和教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0053)资助项目。
② 女,1971 年生,博士,教授,博士生导师;研究方向:船舶与水下航行器自主控制与仿真;E-mail: cctime99@hrbeu.edu.cn
③ 通讯作者,E-mail: xujinlong@hrbeu.edu.cn
(收稿日期:2014-03-11)

标跟踪,目标跟踪与轨迹跟踪、路径跟踪的最大区别便体现在这里。

在轨迹跟踪问题研究上,李雅普诺夫稳定性理论已成功地应用于欠驱动系统的轨迹跟踪控制中^[2,3],因为该理论能够很好地处理模型的耦合性和非线性。Ghommam 通过引入坐标变换和输入变换将系统化为三角结构形式,基于级联系统和反步法设计连续的时变自适应控制律保证了跟踪误差系统的全局渐进稳定性^[4]。毕凤阳根据给定期望轨迹形式为时间参数的曲线和虚拟 UUV,分别采用反步法和级联方法设计了轨迹跟踪控制器^[5]。俞建成等对于给定期望时间参数轨迹分别提出了神经网络直接自适应控制方法和基于模糊神经网络的自适应控制方法,结合李亚普诺夫稳定性理论证明了闭环跟踪误差系统在有界扰动和逼近误差作用下的一致最终有界^[6,7]。张利军等设计了基于 L2 干扰抑制的鲁棒神经网络控制方法,通过神经网络对模型不确定性进行学习,通过设计鲁棒项对神经网络估计误差进行反馈补偿,保证系统 L2 增益满足设计要求^[8]。贾鹤鸣等提出了基于动态递归模糊神经网络的自适应输出反馈控制器实现对 UUV 的跟踪控制,将跟踪误差模型分解为线性部分和非线性部分,分别设计动态补偿器、神经网络自适应控制器和鲁棒项^[9]。

对于路径跟踪问题,Lapierre 等通过引入期望路径上“虚拟向导”的概念避免奇异值问题,设计控制虚拟向导沿路径的切向移动速度,获得的跟踪误差方程是系统状态与参考点动态之间的映射关系,从而实现了协作式路径跟踪策略^[10],并基于 Serret-Frenet 坐标建立了非奇异路径跟踪误差方程,研究了 UUV 水平面的非线性路径跟踪控制方法,引入趋近角的概念改善了 UUV 初始跟踪过程的动态特性^[11]。贾鹤鸣等又基于视线法建立了直线航迹跟踪模型,通过将跟踪误差动态分解为两个互联的子系统,基于反步法和级联系统理论证明了整个系统的稳定性^[12]。Borhaug 等基于重新定义参考坐标系设计了视线角导引律,基于级联系统理论和反步法分别设计控制器实现了对横向跟踪误差和垂向跟踪误差的消除^[13]。Encarnacao 等基于正交投影点的思想建立了曲线路径跟踪误差方程,要求 UUV 初始位置必须位于期望路径的最小曲率半径之内,否则无法实现全局收敛^[14]。Ma 利用视线法导引策略,将跟踪误差系统分解为位置和姿态的互联系统,基于级联系统理论分析保证闭环跟踪系统的全局 K

指数收敛^[15]。向先波针对海流扰动下欠驱动水下机器人的水平面路径跟踪问题,针对位置跟踪,通过建立“趋近角”路径跟踪导引策略实现了对期望路径的收敛,然后基于反步法设计了真实控制输入实现了对姿态子系统的跟踪控制,基于李雅普诺夫稳定性理论证明了闭环路径跟踪系统的稳定性^[16]。陈子印针对欠驱动 UUV 的路径跟踪控制问题,基于二阶滤波器的反步设计方法,将虚拟控制作为滤波器的参考输入,通过积分而非微分过程获得虚拟控制量的滤波值及其导数值,避免了对虚拟控制解析求导的繁琐过程^[17]。王宏健等为实现存在模型不确定性时的 UUV 水平面精确路径跟踪控制,引入微分同胚变换建立了以移动虚拟向导为原点的 Serret-Frenet 坐标系下的路径跟踪误差模型,基于反步法分别设计纵向速度控制律和艏向控制器实现对跟踪路径误差的消除,设计了鲁棒自适应控制器对模型不确定性进行补偿^[18]。进而针对欠驱动水下航行器的三维直线航迹跟踪控制问题,基于虚拟向导建立了三维航迹跟踪误差模型,采用反馈增益反步法设计了航迹跟踪控制器,通过合理选择控制器参数消除了部分非线性项,简化了虚拟控制量的形式,从而能够避免基于视线法设计导引律时存在固有奇异值点的问题^[19]。

对于目标跟踪问题,由于无法通过提前预知目标的未来运动路径信息来为控制算法提供期望输入,从而使得适合路径和轨迹跟踪的控制算法无法直接应用于求解目标跟踪控制问题。为此,Naeem 等将单纯追击导引算法应用到了 UUV 的缆线和管线的跟踪问题中,用遗传算法将单纯追击算法产生的参考航迹进行优化,通过结合模型预测控制算法完成了对目标点的当前位置的跟踪^[20]。但是单纯追击导引算法不利于实时地跟上目标位置,会产生尾随的跟踪问题,Breivik 对目标跟踪问题进行了初步讨论,将平行目标接近法引入无人艇的水面目标跟踪控制中,将其作为导引算法为控制器提供期望艏向和速度等信息,并详细讨论了目标跟踪与轨迹跟踪和路径跟踪问题的区别,指出了目标跟踪不是基于路径的跟踪问题^[21]。

本文基于 Breivik 的研究工作,为欠驱动 UUV 的目标跟踪设计了一种基于非线性 UUV 数学模型的级联自适应控制算法,并通过应用级联理论将运动学控制子系统和动力学控制子系统统一起来,给出了闭环系统稳定性的证明过程。

2 UUV 控制模型

为了方便研究 UUV 目标跟踪控制算法,本文仅考虑水平面三自由度跟踪控制问题,假设 UUV 仅在定深水线面上通过纵移、横移和转艏跟踪目标,由此建立欠驱动 UUV 的数学模型。

UUV 水平面运动坐标系如图 1 所示,其中 $E\xi\eta$ 为固定坐标系, OXY 为载体坐标系。固定坐标系的原点 E 可以选在海面或海中某一点, $E\eta$ 指向正北方向, $E\xi$ 与指向正东方向, $E\eta$ 垂直;载体坐标系的原点 O 通常选取在 UUV 的重心处, OX 轴取在纵剖面内,指向船艏, OY 轴与纵剖面垂直,指向右舷方向。

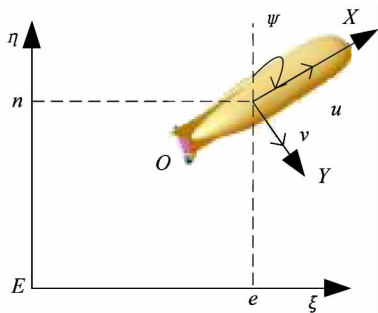


图 1 UUV 水平面运动坐标系

UUV 数学模型由运动学模型和动力学模型两部分组成。固定坐标系中 UUV 的位置和艏向向量定义为 $\boldsymbol{\eta} = [n, e, \psi]^T$, 其中 (n, e) 为坐标位置, ψ 为艏向角;载体坐标系中 UUV 的速度和角速度向量定义为 $\boldsymbol{\nu} = [u, v, r]^T$, u, v 分别为沿 UUV 纵向和右舷方向的线速度, r 为转艏角速度。根据文献[19], UUV 在水下空间的运动视为刚体在流体中的运动,通过坐标系之间的旋转变换,以及流体中刚体的牛顿-欧拉运动方程,三自由度 UUV 数学模型可以表示为

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\eta}} &= \boldsymbol{J}(\boldsymbol{\psi})\boldsymbol{\nu} \\ \boldsymbol{M}\dot{\boldsymbol{\nu}} + \boldsymbol{N}(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu} &= \boldsymbol{\tau} \end{aligned} \tag{1}$$

其中, $\boldsymbol{M}$ 为广义质量矩阵,且有 $\boldsymbol{M} = \boldsymbol{M}^T > 0$; $\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\psi})$ 为载体坐标系到固定坐标系的旋转变换矩阵; $\boldsymbol{N}(\boldsymbol{\nu})$ 为水动力科里奥利和向心力矩阵以及流体水动力阻尼矩阵组成的非线性项; $\boldsymbol{\tau} = [\tau_x \ 0 \ \tau_\psi]^T$ 为欠驱动 UUV 控制器设计所要得到的三个自由度上控制力和力矩向量。且有

$$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\psi}) = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{M} &= \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & m_{23} \\ 0 & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} m - X_u & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_v & mx_g - Y_r \\ 0 & mx_g - N_v & I_z - N_r \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{N}(\boldsymbol{\nu}) &= \begin{bmatrix} n_{11} & 0 & 0 \\ 0 & n_{22} & n_{23} \\ 0 & n_{32} & n_{33} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -X_u & 0 & 0 \\ 0 & -Y_u & mu - Y_r \\ 0 & -N_u & mx_g u - N_r \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{4}$$

3 控制器设计

首先,假设目标在固定坐标系中的位置为 $(n_t(t), e_t(t))$, 运动速度为 $\boldsymbol{\nu}_t = [u_t(t), v_t(t)]^T$, 若要进行目标跟踪,则 UUV 的控制目标为

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (n(t), e(t)) = (n_t(t), e_t(t)) \tag{5}$$

由于欠驱动 UUV 缺少横向的控制输入,只能通过转艏和纵向的控制完成目标跟踪,因此跟踪中需要根据目标的位置和速度的测量信息计算 UUV 的期望艏向和期望纵向速度。本文根据目标和 UUV 的当前相对位置信息获得 UUV 的期望艏向 ψ_d 和期望速度向量为 $\boldsymbol{\nu}_d = [u_d, v_d]^T$, 由此 UUV 通过完成以下目标来达到对目标位置的跟踪:

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \psi &= \psi_d \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \boldsymbol{\nu} &= \boldsymbol{\nu}_d \end{aligned} \tag{6}$$

根据参考文献[22,23],给出下面的定理。

定理 1 考虑系统 $\dot{x}_1 = f(t, x_1, \sigma)$, 假设 $f(t, x_1, \sigma)$ 对于 (x_1, σ) 连续可微,且是全局李普希茨,对 t 一致。如果无激励系统 $\dot{x}_1 = f(t, x_1, 0)$ 在原点 $x_1 = 0$ 处有全局指数稳定的平衡点,那么系统 $\dot{x}_1 = f(t, x_1, \sigma)$ 是输入状态稳定的。

定理 2 考虑如下形式的级联系统

$$\begin{aligned} \sum_1: \dot{x}_1 &= f(x_1) + h(x_1, x_2) \\ \sum_2: \dot{x}_2 &= g(x_2) \end{aligned} \tag{7}$$

该系统的被驱动子系统和驱动子系统分别为

$$\dot{x}_1 = f(x_1) \quad (8)$$

$$\dot{x}_2 = g(x_2) \quad (9)$$

如果把 x_1 看作子系统 $\sum_1$ 的状态变量,把 x_2 看作 $\sum_1$ 的输入变量,若系统 $\sum_1$ 是输入状态稳定的,而且通过设计控制器保证系统 $\sum_2$ 是全局渐近稳定的,则级联系统(式(7))是全局渐近稳定的。

3.1 运动学控制

令 $\boldsymbol{\eta}_1 = [n, e]^T$, $\boldsymbol{\nu}_1 = [u, v]^T$, 则有

$$\dot{\boldsymbol{\eta}}_1 = \mathbf{R}(\psi) \boldsymbol{\nu}_1 \quad (10)$$

其中, $\mathbf{R}(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix}$ 。

定义 $\tilde{n} = n - n_d$, $\tilde{e} = e - e_d$, $\tilde{u} = u - u_d$, $\tilde{v} = v - v_d$, $\tilde{r} = r - r_d$, 则下面等式存在:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\tilde{n}} \\ \dot{\tilde{e}} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u - u_d \\ v - v_d \end{bmatrix} \\ &\quad + \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ v_d \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ v_d \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

于是有

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\tilde{n}} \\ \dot{\tilde{e}} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \dot{n} \\ \dot{e} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{n}_d \\ \dot{e}_d \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ v_d \end{bmatrix} \\ &\quad - \begin{bmatrix} \cos\psi_d & -\sin\psi_d \\ \sin\psi_d & \cos\psi_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ v_d \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

进而,定义艏向偏差 $\tilde{\psi} = \psi - \psi_d$, 并定义 $\mathbf{g}(\tilde{\psi})$ 为

$$\mathbf{g}(\tilde{\psi}) = \begin{bmatrix} \frac{\cos\tilde{\psi} - 1}{\tilde{\psi}} & -\frac{\sin\tilde{\psi}}{\tilde{\psi}} \\ \frac{\sin\tilde{\psi}}{\tilde{\psi}} & \frac{\cos\tilde{\psi} - 1}{\tilde{\psi}} \end{bmatrix} \quad (13)$$

则有

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\tilde{n}} \\ \dot{\tilde{e}} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \end{bmatrix} \\ &\quad + \left(\begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \cos\psi_d & -\sin\psi_d \\ \sin\psi_d & \cos\psi_d \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} u_d \\ v_d \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \end{bmatrix} \\ &\quad + \begin{bmatrix} \cos\psi_d & -\sin\psi_d \\ \sin\psi_d & \cos\psi_d \end{bmatrix} \mathbf{g}(\tilde{\psi}) \begin{bmatrix} u_d \\ v_d \end{bmatrix} \tilde{\psi} \end{aligned} \quad (14)$$

从而,将期望速度变量 $[u_d, v_d]^T$ 选择为如下形式:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ v_d \end{bmatrix} = -\mathbf{g}^{-1}(\tilde{\psi}) \begin{bmatrix} \cos\psi_d & -\sin\psi_d \\ \sin\psi_d & \cos\psi_d \end{bmatrix}^{-1} \frac{K_{\eta_1}}{\tilde{\psi}} \begin{bmatrix} \tilde{n} \\ \tilde{e} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_t \\ v_t \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中, $K_{\eta_1} > 0$ 为一个常值正数。值得指出的是,将期望速度变量 $[u_d, v_d]^T$ 选择为上面的形式,可以保证当 UUV 到达目标位置时, UUV 的运动速度与被跟踪目标相同。

由上述内容可以得到:

$$\dot{\boldsymbol{\eta}}_1 = -K_{\eta_1} \tilde{\boldsymbol{\eta}}_1 + \mathbf{R}(\psi) \begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \end{bmatrix} + \mathbf{R}(\psi_d) \mathbf{g}(\tilde{\psi}) \tilde{\psi} \quad (16)$$

将上式中的速度偏差 $[\tilde{u}, \tilde{v}]^T$ 扩展为 $\tilde{\boldsymbol{\nu}} = [\tilde{u}, \tilde{v}, \tilde{r}]^T$, 并进一步定义

$$\mathbf{z} = [\tilde{\psi}, \tilde{\boldsymbol{\nu}}]^T \quad (17)$$

则有

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\eta}}_1 &= -K_{\eta_1} \tilde{\boldsymbol{\eta}}_1 + \mathbf{J}(\psi) \tilde{\boldsymbol{\nu}} + \mathbf{R}(\psi_d) \mathbf{g}(\tilde{\psi}) \tilde{\psi} \\ &= -K_{\eta_1} \tilde{\boldsymbol{\eta}}_1 + \mathbf{f}_1(\psi, \psi_d) \mathbf{z} \end{aligned} \quad (18)$$

其中,函数 $\mathbf{f}_1(\psi, \psi_d) = [\mathbf{R}(\psi_d) \mathbf{g}(\tilde{\psi}), \mathbf{J}(\psi)]$ 。如果设计动力学控制器保证 UUV 的速度和艏向偏差 $\tilde{\boldsymbol{\nu}} = 0$ 以及 $\tilde{\psi} = 0$, 那么通过构造一个标准李雅普诺夫函数 $V_{\eta_1} = \frac{1}{2} \tilde{\boldsymbol{\eta}}_1^T \tilde{\boldsymbol{\eta}}_1$ 则可以得到 $\dot{V}_{\eta_1} = -K_{\eta_1} \tilde{\boldsymbol{\eta}}_1^T \tilde{\boldsymbol{\eta}}_1$,

也就是说通过选择期望速度变量可以保证运动学子系统具有全局一致渐近稳定性。

3.2 动力学控制器

接下来为动力学子系统设计控制器。首先定义向量 $\mathbf{h} = [0 \ 0 \ 1]^T$, 并选择误差向量 $\mathbf{z}_1$ 为

$$\mathbf{z}_1 = \tilde{\boldsymbol{\psi}} = \mathbf{h}\boldsymbol{\eta} - \psi_d \quad (19)$$

选择李雅普诺夫候选函数 $V_1 = \frac{1}{2} k_1 z_1^2$, 其中 $k_1 > 0$ 为增益矩阵, V_{z_1} 沿 $\mathbf{z}_1$ 的微分为

$$\dot{V}_1 = k_1 z_1 \dot{z}_1 = k_1 z_1 (\mathbf{h}^T \dot{\boldsymbol{\eta}} - \dot{\psi}_d) = k_1 z_1 (\mathbf{h}^T \boldsymbol{\nu} - \dot{\psi}_d) \quad (20)$$

若定义 $\mathbf{z}_2 = \boldsymbol{\nu} - \boldsymbol{\alpha}$, 其中 $\mathbf{z}_2 = [z_{21}, z_{22}, z_{23}]^T$, $\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3]^T \in \Re^3$ 为用于稳定 $\mathbf{z}_2$ 的虚拟输入, 具体形式将在后文给出。选择虚拟控制输入 $\alpha_3 = \dot{\psi}_d - z_1$, 则有 $\dot{V}_1 = -k_1 z_1^2 + k_1 z_1 \mathbf{h}^T \mathbf{z}_2$ 。

选择第二个李雅普诺夫候选函数:

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} \mathbf{z}_2^T \mathbf{M} \mathbf{z}_2 + \frac{1}{2} \bar{\mathbf{b}} \Gamma^{-1} \bar{\mathbf{b}} \quad (21)$$

其中,若令 $\hat{\mathbf{b}} \in \mathbb{R}^3$ 为自适应估计器对慢变环境干扰的估计值, $\bar{\mathbf{b}} = \hat{\mathbf{b}} - \mathbf{b}$ 为对慢变环境干扰的估计误差, $\Gamma = \Gamma^T > 0$ 为估计器的自适应增益矩阵。由于对于慢变环境干扰有 $\dot{\mathbf{b}} = 0$, 从而 $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\hat{\mathbf{b}}} = \dot{\hat{\boldsymbol{\eta}}}$ 。 V_2 的微分为:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= -k_1 z_1^2 + k_1 z_1 \mathbf{h}^T \mathbf{z}_2 + \mathbf{z}_2^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{z}}_2 + \bar{\mathbf{b}} \Gamma^{-1} \dot{\bar{\mathbf{b}}} \\ &= -k_1 z_1^2 + k_1 z_1 \mathbf{h}^T \mathbf{z}_2 + \mathbf{z}_2^T \mathbf{M}(\dot{\boldsymbol{\nu}} - \dot{\boldsymbol{\alpha}}) + \bar{\mathbf{b}} \Gamma^{-1} \dot{\bar{\mathbf{b}}} \\ &= -k_1 z_1^2 + k_1 z_1 \mathbf{h}^T \mathbf{z}_2 + \bar{\mathbf{b}} \Gamma^{-1} \dot{\bar{\mathbf{b}}} \\ &\quad + \mathbf{z}_2^T (\boldsymbol{\tau} + \mathbf{R}(\psi) \mathbf{b} - \mathbf{N}(\boldsymbol{\nu}) \boldsymbol{\nu} - \mathbf{M} \dot{\boldsymbol{\alpha}}) \\ &= -k_1 z_1^2 + \bar{\mathbf{b}} \Gamma^{-1} (\dot{\bar{\mathbf{b}}} - \Gamma \mathbf{R}(\psi) \mathbf{z}_2) \\ &\quad + \mathbf{z}_2^T (\mathbf{h} k_1 z_1 + \boldsymbol{\tau} + \mathbf{R}^T(\psi) \hat{\mathbf{b}} - \mathbf{N}(\boldsymbol{\nu}) \boldsymbol{\nu} - \mathbf{M} \dot{\boldsymbol{\alpha}}) \end{aligned} \quad (22)$$

因此,通过选择自适应控制律

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau} &= \mathbf{N}(\boldsymbol{\nu}) \boldsymbol{\nu} + \mathbf{M} \dot{\boldsymbol{\alpha}} - \mathbf{h} k_1 z_1 - \mathbf{R}^T(\psi) \hat{\mathbf{b}} - \mathbf{K}_2 \mathbf{z}_2 \\ \dot{\hat{\mathbf{b}}} &= \Gamma \mathbf{R}(\psi) \mathbf{z}_2 \end{aligned} \quad (23)$$

便能够得到

$$\dot{V}_2 = -k_1 z_1^2 - \mathbf{z}_2^T \mathbf{K}_2 \mathbf{z}_2 \leq 0 \quad (24)$$

取 $\alpha_1 = u_d$, 并且定义 $\mathbf{R}^T(\psi) \hat{\mathbf{b}} = [\hat{b}_1^* \ \hat{b}_2^* \ \hat{b}_3^*]^T$, $\mathbf{R}^T(\psi) \mathbf{b} = [b_1^* \ b_2^* \ b_3^*]^T$, 则有

$$m_{11}(\dot{u} - \dot{u}_d) + k_1(u - u_d) + (b_1^* - \hat{b}_1^*) = 0 \quad (25)$$

由于自适应慢变环境干扰估计器可使 $\lim_{t \rightarrow \infty} (b_1^* - \hat{b}_1^*) \rightarrow 0$, 从上式可知,对于纵向速度有 $\lim_{t \rightarrow \infty} (u - u_d) = 0$ 。

根据前面的内容,对 α_3 有下式成立:

$$\begin{aligned} \dot{\alpha}_3 &= \dot{r}_d - \dot{z}_1 \\ &= \dot{r}_d - r + r_d \\ &= \dot{r}_d - (z_{23} + \alpha_3) + r_d \\ &= \dot{r}_d - (z_{23} - z_1 + r_d) + r_d \\ &= z_1 - z_{23} + \dot{r}_d \end{aligned} \quad (26)$$

对于欠驱动 UUV (横向力 $\tau_2 = 0$), 由于 $v = \alpha_2 + z_{22}$, $r = \alpha_3 + z_{23}$, 将横向的动力学方程展开有

$$\begin{aligned} m_{22} \dot{\alpha}_2 &= -n_{22} \alpha_2 + (K_{22} - n_{22}) z_{22} \\ &\quad + (n_{23} - m_{23}) z_1 + (m_{23} - n_{23}) z_{23} \\ &\quad - m_{23} \dot{r}_d - n_{23} r_d + (b_2^* - \hat{b}_2^*) \end{aligned} \quad (27)$$

若令

$$\begin{aligned} \zeta &= (K_{22} - n_{22}) z_{22} + (n_{23} - m_{23}) z_1 \\ &\quad + (m_{23} - n_{23}) z_{23} - m_{23} \dot{r}_d - n_{23} r_d \\ &\quad + (b_2^* - \hat{b}_2^*) \end{aligned} \quad (28)$$

则

$$m_{22} \dot{\alpha}_2 = -n_{22} \alpha_2 + \zeta \quad (29)$$

从控制器的设计过程可知,由于 $\dot{r}_d$ 和 r_d 有界, $(b_2^* - \hat{b}_2^*)$, z_1 和 z_{23} 收敛于 0, 而且 $n_{22} > 0$, 因此如果将 ζ 看作(式(29))所示的系统的输入,通过选择

$$V_3 = \frac{1}{2} m_{22} \alpha_2^2 \text{ 作为系统(式(29))的李雅普诺夫方}$$

程可知,只要 $|\alpha_2| \geq \frac{\zeta}{n_{22}}$, 根据定理 1, α_2 子系统是输入状态稳定的。

由于所设计的控制器能够保证 $\lim_{t \rightarrow \infty} z_{22} = 0$, 由此得到 $\lim_{t \rightarrow \infty} |\alpha_2 - v| = 0$ 。将 α_2 的表达式带入自适应控制律,便可以得到艏向控制指令。将 UUV 的控制指令展开,得到:

$$\begin{cases} \tau_1 = m_{11} \dot{\alpha}_1 + n_{11} u - \hat{b}_1^* - K_{21} z_{21} \\ 0 = n_{22} v + n_{23} r + m_{22} \dot{\alpha}_2 + m_{23} \dot{\alpha}_3 - \hat{b}_2^* - K_{22} z_{22} \\ \tau_3 = n_{32} v + n_{33} r + m_{32} \dot{\alpha}_2 + m_{33} \dot{\alpha}_3 - \hat{b}_3^* - k_1 z_1 \\ \quad - K_{23} z_{23} \end{cases} \quad (30)$$

根据本文控制算法的设计过程,给出如下引理,并进行证明。

引理 1 对于形如式(1)的欠驱动 UUV 数学模型,通过设计期望速度变量(式(15)),能够保证 UUV 的运动学子系统具有输入状态稳定性。而且,通过结合能够保证动力学子系统是全局渐近稳定的自适应控制器(式(23)),能够完成 UUV 对目标的稳定跟踪。

证明:由期望速度的设计过程给出的等式(18)可知,UUV 与路径上的虚拟目标点的位置偏差 $\tilde{\boldsymbol{\eta}}$ 有

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{\eta}}} = -K_{\eta_1} \tilde{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{f}_1(\boldsymbol{\eta}_1, \mathbf{z}) \mathbf{z} \quad (31)$$

而且,由动力学子系统控制器的设计过程可知,自适应控制器(式(23))可以保证动力学闭环系统的状态变量

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\boldsymbol{\eta}} &= \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\boldsymbol{\psi}} = 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\boldsymbol{\eta}} &= \lim_{t \rightarrow \infty} (\boldsymbol{\nu} - \boldsymbol{\alpha}) = 0 \end{aligned} \quad (32)$$

因此控制器设计保证了 $\boldsymbol{\alpha} \rightarrow \mathbf{v}_d$, 从而

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\boldsymbol{\eta}} = \lim_{t \rightarrow \infty} (\boldsymbol{\nu} - \mathbf{v}_d) = \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\boldsymbol{\nu}} = 0 \quad (33)$$

因此 $\lim_{t \rightarrow \infty} [z_1, z_2]^T = [\tilde{\psi}, \tilde{\nu}]^T = z$, 根据级联系统的定义,可以得到如下形式的 UUV 跟踪控制非线性时变级联系统:

$$\begin{aligned} \sum_{\eta_1} \dot{\tilde{\eta}}_1 &= -K_{\eta_1} \tilde{\eta}_1 + f_1(\eta_1, z)z \\ \sum_z \dot{z} &= f_2(z) \end{aligned} \tag{34}$$

其中, $f_2(z)$ 是动力学控制子系统的函数关系。由于系统 $\sum_z$ 可以看作系统 $\sum_{\eta_1}$ 的非线性扰动,根据级联系统稳定性的定理 2 可知,由于自适应控制器(式(23))能够保证 $\sum_z$ 子系统的全局渐进稳定性,而 $\sum_{\eta_1}$ 又是输入状态稳定的,因而级联系统(式(33))是全局渐进稳定的。证明完毕。

4 仿真分析

本文以文献[24]中提供的无人水下航行器 INFANTE 作为研究对象,通过 MATLAB 进行仿真验证。无人水下航行器 INFANTE 长度为 4.5m,总宽度为 1.1m,高度为 0.6m,在水中的最大速度 2.5m/s,水动力参数如表 1 所示,尾部装有两个主推进器、两个舵、两个艏鳍和两个艉鳍,是典型的欠驱动 UUV。外观模型如图 2 所示。

表 1 UUV 水动力参数

$m = 2535$ (kg)	$I_z = 2000$ (kg · m ²)	$X_{\dot{u}} = -142$ (kg)
$Y_{\dot{v}} = -1700$ (kg)	$Y_v = -346$ (kg/m)	$X_{ u u} = -35$ (kg/m)
$N_{\dot{r}} = -1350$ (kg · m ² /rad)	$N_r = -300$ (kg · m ² /rad ²)	$N_{ r r} = -350$ (kg · m ² /rad ²)



图 2 INFANTE 水下航行器

UUV 运动的实际仿真模型为

$$\begin{cases} \dot{u} = \frac{m_2}{m_1}vr - \frac{d_1}{m_1}u + \frac{1}{m_1}F_u + \omega_1 \\ \dot{v} = -\frac{m_1}{m_2}ur - \frac{d_2}{m_2}v + \omega_2 \\ \dot{r} = \frac{m_1 - m_2}{m_3}uv - \frac{d_3}{m_3}r + \frac{1}{m_3}F_N + \omega_3 \end{cases} \tag{35}$$

参数的具体表达式如下:

$$\begin{aligned} m_1 &= m - X_{\dot{u}}, \quad m_2 = m - Y_{\dot{v}}, \quad m_3 = I_z - N_{\dot{r}} \\ d_1 &= X_u + X_{|u|u} |u|, \quad d_2 = Y_v + Y_{|v|v} |v| \\ d_3 &= N_r + N_{|r|r} |r| \end{aligned} \tag{36}$$

仿真时间为 1000s,仿真中使用一个以期望动态沿预定路径运动的虚拟质点作为被跟踪目标点,目标点初始位置的固定坐标为(0,400),UUV 的初始位置为(0,300)初始艏向为 0°。仿真过程中各参数的变化情况如图 3 到图 8 所示。

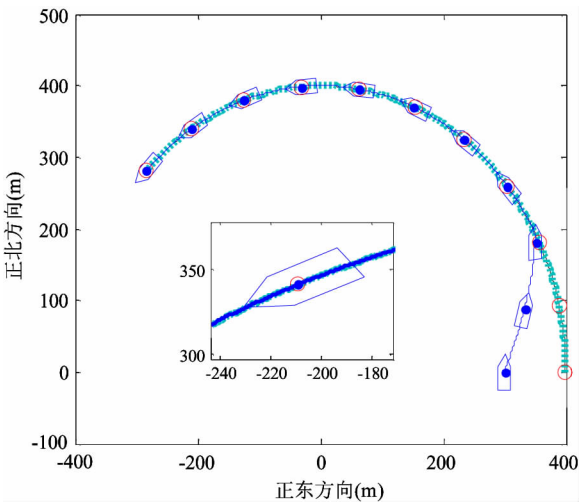


图 3 UUV 目标跟踪控制效果仿真图

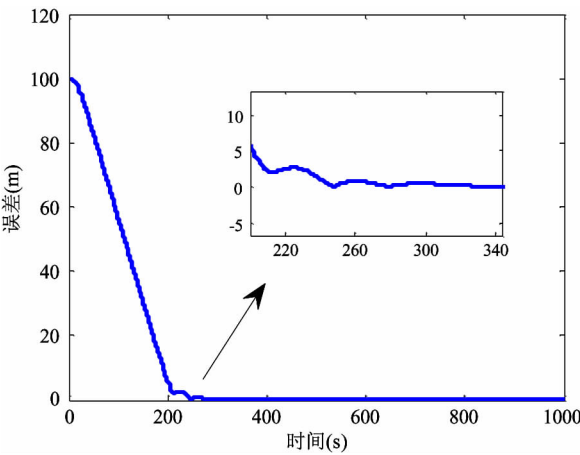


图 4 UUV 目标跟踪误差变化曲线

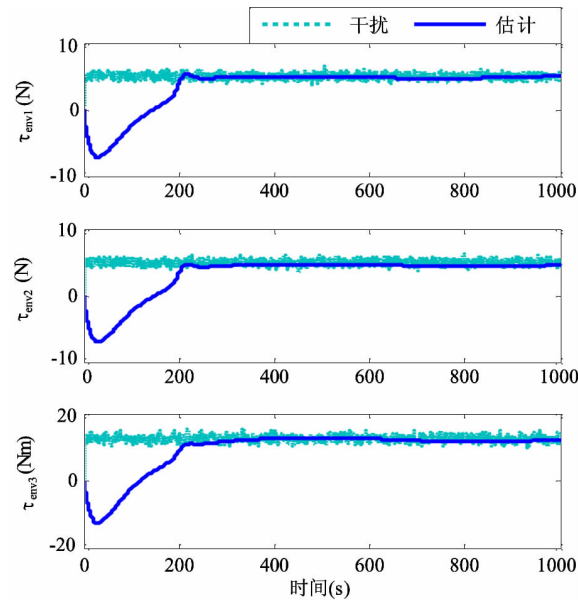


图 5 跟踪过程中慢变环境干扰和估计

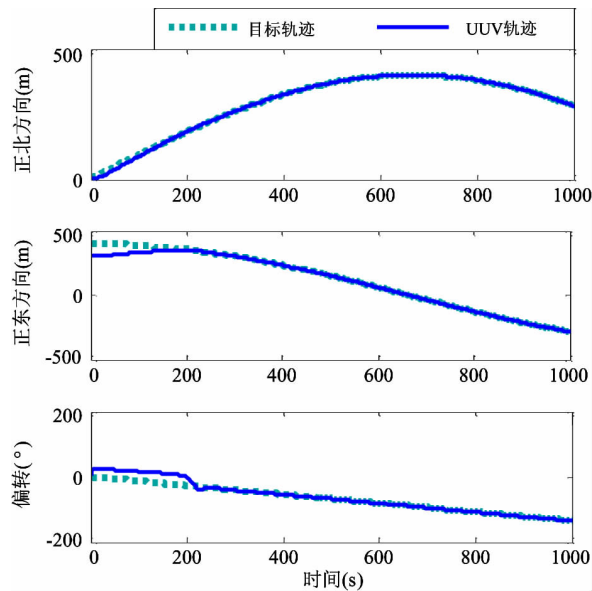


图 6 跟踪过程 UUV 位置和艏向变化

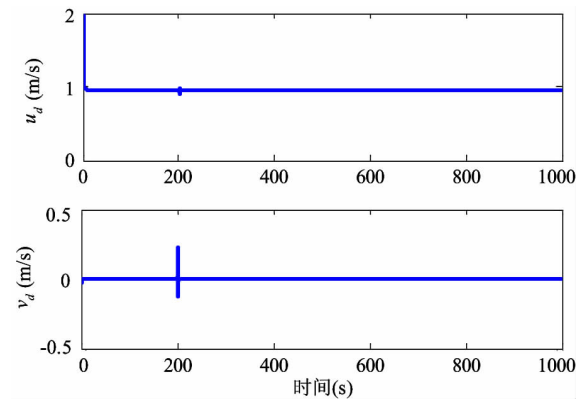


图 7 UUV 期望速度变化

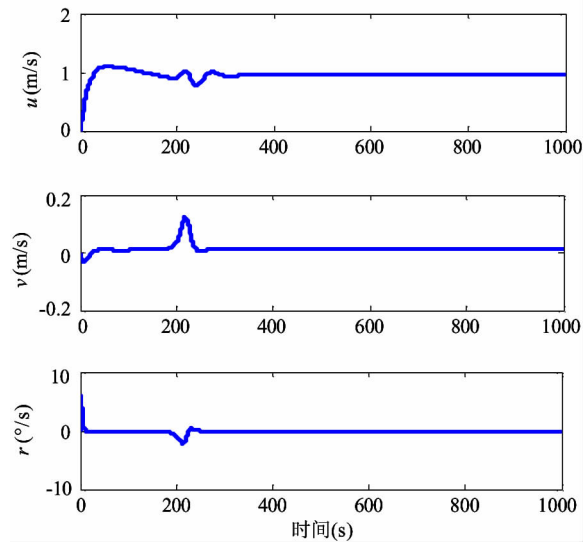


图 8 UUV 跟踪过程速度变化

UUV 的目标跟踪效果如图 3 所示。点线代表目标的运动轨迹,实线为 UUV 的实际跟踪轨迹,为了清楚地显示出每个时间点的目标跟踪情况,每隔 100s 画出 UUV 的实际跟踪位置和目標点位置。图 4 为对应的跟踪过程中 UUV 跟踪误差变化曲线。图 5 是为了验证自适应估计器的效果,仿真中对 UUV 施加的慢变环境干扰及估计值的变化情况。慢变环境干扰指海流对 UUV 的影响, τ_{env1} 、 τ_{env2} 、 τ_{env3} 分别表示海流对 UUV 的纵向、横向及艏向的影响。由图 3 到图 5 可以看到,使用本文设计的控制算法,欠驱动 UUV 可以很好地对目标点进行跟踪,跟踪误差收敛较快,跟踪过程十分稳定。由于初始时段 UUV 与目标点的偏差较大和 UUV 快速的位置调节,开始对环境干扰的估计产生了较大偏差,但随着 UUV 与目标点偏差的减小,估计器抵消了环境干扰,并去除了高频扰动,所设计的控制具有一定的鲁棒性。进而,图 6 给出了单独的位置和艏向响应,图 7 给出了运动学子系统的虚拟控制获得的欠驱动 UUV 的纵向和横向期望速度,图 8 给出了 UUV 跟踪过程中的纵向、横向及艏向速度变化,图 9 给出了对应的控制力和力矩变化,可以看出,虽然 UUV 的横向控制力为零,但跟踪开始时由于调整力矩和环境干扰的影响,开始时会产生横向速度变化,当 UUV 对目标进行稳定跟踪后,横向速度逐渐收敛到零。

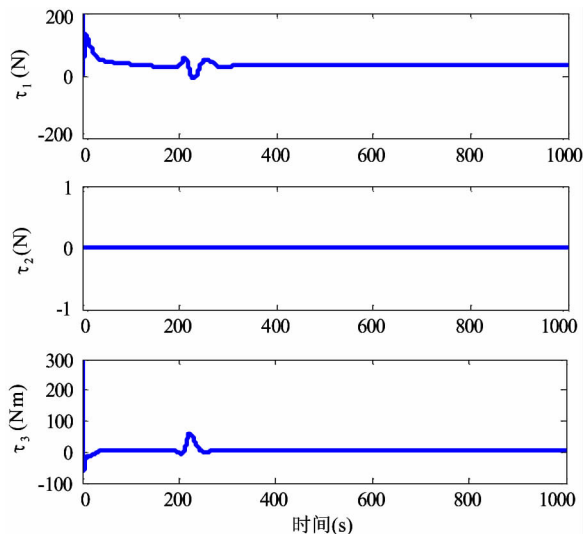


图9 UUV 跟踪过程控制力和力矩变化

5 结 论

本文研究了欠驱动无人水下航行器(UUV)的水平面目标跟踪控制问题,分析了目标跟踪与轨迹跟踪和路径跟踪的区别,为仅能获得目标瞬时位置、速度等信息的目标跟踪设计了一种基于模型的级联自适应跟踪控制算法。与传统的欠驱动 UUV 跟踪控制的控制器设计方法不同,本文方法考虑了水动力阻尼矩阵中非对角线上元素对控制系统的影响,通过将期望速度作为运动学子系统的虚拟控制输入,设计运动控制算法来稳定 UUV 与目标之间的位置偏差,并设计自适应反步控制算法来获得动力学子系统对速度的控制。同时使用自适应项估计海流产生的慢变环境干扰,使用矩阵扩充和坐标变换将整个控制系统转化为级联系统的形式,本文基于级联理论证明了目标跟踪闭环控制系统的一致渐进稳定性。本文方法的有效性通过 INFANTE 型 UUV 的数学模型数值仿真实验得到了验证。

参考文献

- [1] Fossen T I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. John Wiley & Sons Ltd, 2011. 100-113
- [2] Jiang Z. Global tracking control of underactuated ships by Lyapunov's direct method. *Automatica*, 2002, 38(2): 301-309
- [3] Do K D, Pan J. Global tracking control of underactuated ships with nonzero off-diagonal terms in their system matrices. *Automatica*, 2005, 41(1):87-95
- [4] Ghommam J, Mnif F, Derbel N. Global stabilisation and tracking control of underactuated surface vessels. *IET*

Control Theory and Applications, 2010, 4(1):71-88

- [5] 毕凤阳. 欠驱动自主水下航行器的非线性鲁棒控制策略研究:[博士学位论文]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010. 65-72
- [6] 俞建成,张艾群,王晓辉等. 基于模糊神经网络的水下机器人直接自适应控制. *自动化学报*, 2007,33(8): 840-846
- [7] 俞建成,李强,张艾群等. 水下机器人的神经网络自适应控制. *控制理论与应用*, 2008, 25(1):9-13
- [8] 张利军,贾鹤鸣,边信黔等. 基于 L2 干扰抑制的水下机器人三维航迹跟踪控制. *控制理论与应用*, 2011, 28(5):645-651
- [9] 贾鹤鸣,张利军,齐雪等. 基于神经网络的水下机器人三维航迹跟踪控制. *控制理论与应用*, 2012, 29(7): 877-883
- [10] Lapiere L, Soetanto D, Pascoal A. Nonlinear Path Following with Applications to the Control of Autonomous Underwater Vehicles. Hawaii, USA, 2003. 1485-1492
- [11] Lapiere L, Soetanto D. Nonlinear path-following control of an AUV. *Ocean Engineering*, 2007, 34(11): 1734-1744
- [12] 贾鹤鸣,程相勤,张利军等. 基于自适应 Backstepping 的欠驱动 AUV 三维航迹跟踪控制. *控制与决策*, 2012,5(27):652-664
- [13] Borhaug E, Pettersen K Y. Cross-track control for underactuated autonomous vehicles. In: Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, Seville, Spain, 2005. 897-905
- [14] Encarnacao P, Pascoal A. 3D Path Following for Autonomous Underwater Vehicle. The 39th IEEE Conference on Decision and Control. Australia, 2000. 1029-1037
- [15] Ma B. Global k-exponential asymptotic stabilization of underactuated surface vessels. *Systems & Control Letters*, 2009,58(3):194-201
- [16] 向先波. 二阶非完整性水下机器人的路径跟踪与协调控制研究[博士学位论文]. 武汉:华中科技大学, 2010. 79-86
- [17] 陈子印. 欠驱动无人水下航行器三维路径跟踪反步控制方法研究[博士学位论文]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2013. 56-70
- [18] 王宏健,陈子印,边信黔等. 基于虚拟向导的自主水下航行器鲁棒自适应路径跟踪控制. In: Proceedings of the 31st Chinese Control Conference, Hefei, China. 2012. 4283-4288
- [19] 王宏健,陈子印,边信黔等. 欠驱动水下航行器三维直线航迹跟踪控制. *控制理论与应用*, 2013,30(4):443-453
- [20] Naeem W, Sutton R, Ahmad S M. Pure Pursuit Guidance

and Model Predictive Control Autonomous Underwater Vehicle for Cable/Pipeline Tracking. 2004

[21] Breivik M. Topics in Guided Motion Control of Marine Vehicles[Ph. D dissertation]. Norweign; Norwegian University of Science and Technology, 2010. 36-50

[22] Khalil H K. Nolinear Systems. Michigan, USA; Pearson Education Inc, 2005. 45-56

[23] 向美鹏. 级联系统的全局稳定性与解的有界性[硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学硕士学位论文, 2009. 20-25

[24] Silvestre C, Pascoal A. Control of the INFANTE AUV using gain scheduled static output feedback. *Control Engineering Practice*, 2004,12(12):1501-1509

Research on cascaded adaptive target tracking control
for underactuated UUV

Wang Hongjian*, Xu Jinlong*, Zhang Aihua**

(* College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

(** College of Mechanical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620)

Abstract

The design of target tracking algorithms for underactuated unmanned underwater vehicles (UUV) was studied, and based on the nonlinear mathematic model for UUV, a cascaded adaptive target tracking control algorithm was designed to guarantee the underactuated UUV system’s global asymptotic stability. Different from the design of general tracking control algorithms, this design considers the influence of the off-diagonal elements of the hydrodynamic damping matrix on the control system, and obtains the longitudinal desired speed of the underactuated UUV by introducing the virtual control of the kinematic subsystem. Meanwhile, it uses the backstepping method combined with the Lyapunov stability analysis to obtain the adaptive backstepping control law of the kinetic subsystem, uses the adaptive item to estimate the slow varying environmental interferences caused by ocean current, and then transforms the target tracking control system into a nonlinear cascaded system composed of the kinematic subsystem and the kinetic subsystem to give a cascaded adaptive control algorithm for underactuated UUV target tracking. The global stability of the closed-loop system is proved by using the cascaded theory, and the effectiveness of the proposed design method was verified by simulation.

Key words: underactuated unmanned underwater vehicles (UUV), cascaded system, target tracking, adaptive control