

文章编号: 1673-3193(2024)02-0132-14

基于水下目标抓取的UVMS抗扰控制方法研究

魏延辉^{1,2}, 赵康康¹, 谢吉顺¹

(1. 哈尔滨工程大学 智能科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 哈尔滨工程大学 三亚南海创新发展基地, 海南 三亚 572000)

摘要: 水下机器人-机械臂系统(UVMS)在水下作业过程中存在自身结构不确定性干扰、系统动力学耦合干扰以及海流干扰的问题, 这对水下机器人的运动控制提出了更高的要求。本文以某欠驱动水下机器人系统作为研究对象, 提出了一种误差受限的抗干扰控制方法。基于视线法和设定性能函数得到UVMS的误差动力学模型, 再基于此模型设计水下机器人(AUV)抗扰控制器。通过牛顿-欧拉方程估算机械臂对于AUV本体的耦合干扰并进行实时补偿。采用神经网络控制补偿AUV系统的结构性不确定性, 并利用自适应控制来补偿神经网络估计误差、非结构性不确定性误差和机械臂耦合干扰的补偿误差。通过机械臂静止和定点作业两组工况下的仿真实验发现, 运动控制任务符合设定预期时间和跟踪精度, 同时也验证了分离式UVMS运动控制方案在水下定点作业任务中的可行性和有效性。本文方法具有很强的鲁棒性, 且能够通过此抗扰控制方法来抑制这些不确定性干扰的影响。

关键词: UVMS; 抗扰控制器; 水下定点作业; 误差动力学方程

中图分类号: TP183 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1673-3193.2024.02.002

引用格式: 魏延辉, 赵康康, 谢吉顺. 基于水下目标抓取的UVMS抗扰控制方法研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2024, 45(2): 132-145.

WEI Yanhui, ZHAO Kangkang, XIE Jishun. Research on anti-disturbance control method of UVMS based on underwater target capture[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2024, 45(2): 132-145.

Research on Anti-Disturbance Control Method of UVMS Based on Underwater Target Capture

WEI Yanhui^{1,2}, ZHAO Kangkang¹, XIE Jishun¹

(1. College of Intelligent Systems Science and Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;
2. Nanhai Innovation and Development Center, Harbin Engineering University, Sanya 572000, China)

Abstract: The underwater Robot-Manipulator system (UVMS) has the problems of its own structure uncertainty interference, system dynamics coupling interference and ocean current interference in the underwater operation process, which puts forward higher requirements for the motion control of the underwater robot. In this paper, an error-constrained anti-disturbance control method was proposed for an underactuated AUV system. Based on the line-of-sight method and the set performance function, the error dynamics model of UVMS was obtained, and the underwater vehicle (AUV) anti-disturbance controller was

收稿日期: 2023-09-25

基金项目: 海南省科技计划三亚崖州湾科技城自然科学基金联合资助项目(2021JJLH0003)

作者简介: 魏延辉(1978-), 男, 教授, 博士, 主要从事海洋智能工程装备技术、水下机械臂技术、作业型水下机器人等领域的研究。
E-mail: wyhhit@163.com。

designed based on this model. The Newton-Euler equation was used to estimate the coupling interference of the manipulator to the AUV body and compensate it in real time. The neural network control was used to compensate the structural uncertainty of the AUV system, and the adaptive control was used to compensate the neural network estimation error, the unstructured uncertainty error and the compensation error of the manipulator coupling disturbance. Through the simulation experiments under the static and fixed-point operation conditions of the manipulator, it is found that the motion control task conforms to the set expected time and tracking accuracy, and it also verifies the feasibility and effectiveness of the separated UVMS motion control scheme in the underwater fixed-point operation task. The proposed method has strong robustness, and the influence of these uncertainties can be suppressed by this anti-disturbance control method.

Key words: UVMS; disturbance rejection controller; underwater fixed point operation; error dynamic equation

0 引言

随着社会的不断发展,陆地资源渐显匮乏,海洋资源的开发越来越得到人们的重视^[1]。水下机器人-机械手系统(UVMS)在海洋地质勘查、水底打捞救援、设备维护、样本采集等方面发挥着重要的作用。由于AUV会一直受到水下机械臂耦合干扰、AUV系统自身的结构性不确定性和海流干扰等因素所引起的非结构性不确定性的影响,需要通过具有强鲁棒性的抗扰控制方法来抑制这些不确定性的影响,因此,设计一种可以高效抵抗扰动的控制器对于UVMS来说至关重要。

为了研究水下机器人-机械手系统(UVMS)复杂的动态耦合效应,部分学者将UVMS视为一个整体进行集中控制,致力于UVMS模型的建立。因为集中式的控制器需要面对较大的系统模型参数和非参数的不确定性,而基于模型的控制器可以在一定程度上提升控制性能^[2]。Woolfrey等^[3]采用一种自回归(AR)模型对受到海浪干扰的运载器的运动进行相应预测,然后结合模型预测控制MPC实现相对关节运动的优化。Dai等^[4]基于快速增量型模型预测控制器(MPC),并加入扩展卡尔曼滤波器来应对未建模动态、环境干扰和传感器噪声,该方法在UVMS轨迹跟踪过程中具有较好运动控制性能。Oliveira等^[5]提出了一种基于扰动观测器的水下机器人系统模型预测控制方法,在考虑未知项和外部干扰的集总不确定性表示,制定了标称MPC后,开发了二阶滑模扰动观测器(SMDO)来估计集总扰动,MPC使用这些观测器产生无偏预测来应对运载体的动态耦合。

除此之外,将UVMS的本体和机械臂分为2个独立系统分别控制,利用解耦控制也是最常用的方法。Xiong等^[6]提出了一种基于角度和线性动态耦合因子的评估框架,研究了关节构型与耦合效应之间的关系,得到了关节变量的耦合图,该耦合图为机械手轨迹优化提供了理论依据,减少了动态耦合对系统的影响,数值仿真结果验证了所提出的评价框架的有效性。侯冬冬等^[7]提出了一种基于自适应干扰观测器的反步控制方法来提高其抗干扰能力。Mohan等^[8]提出了一种基于任务空间扰动观测器的UVMS协调运动控制方案,允许本体自运动并能进行有效的轨迹跟踪,确保系统具有最小的跟踪误差。Han等^[9]对水下机器人和机械手之间的动态耦合进行了详细的建模和仿真,建模过程描述了最主要的流体动力效应,同时,提出了一种模糊解耦控制器,采用了非对角元素来利用子系统自由度之间的动态耦合和两个子系统之间的动态耦合。Tang等^[10]提出了一种水下运载器操纵系统多任务控制的方法,该方法的主要思想是按优先级组织和组合任务,同时利用零空间映射连续分解任务之间的耦合关系,避免了交互效应。在TRITON项目中,Conti等^[11]提出了一种依赖于运载体和机械手速度的解耦控制方法,将任务优先级冗余分解和任务并发方法进行了结合。

滑模控制得益于系统状态在滑模面上对扰动不敏感的特性,也被大量应用于UVMS的控制中^[12-14]。Fjellstad等^[15-18]提出了四元数反馈控制策略。Du等^[19]针对这种非线性强耦合系统,采用单位四元数反馈设计了滑模控制器,避免了系统的奇异性,获得了良好的动态控制性能。

自主水下机器人(AUV)在水下定点作业过程中主要承担运载水下机械臂到达定点位置并完成作业的任务,因此,所设计的AUV控制器必须在有限时间内跟踪到UVMS任务规划层给出的期望轨迹^[20]。此外,AUV在定点作业的过程中,会遭遇珊瑚礁群和海底狭湾等复杂的海底地形结构,此时为了避免碰撞,需要对AUV运动过程中的位置和姿态进行控制^[21]。针对AUV执行水下定点任务中所存在的问题,本文设计了一种AUV误差受限的抗扰控制方法,可以在补偿水下机械臂耦合干扰,抵抗AUV结构和非结构性不确定性的同时,使AUV在三维空间的轨迹和姿态跟踪误差可以按照设定的性能在有限时间内收敛于期望轨迹,满足了水下定点作业的要求。

本文的主要工作有:1)对AUV的模型进行简化,得到五自由度的AUV运动学与动力学模型;2)建立了基于视线法和设定性能的三维空间的误差动力学模型;3)通过牛顿-欧拉法^[22]估算出水下机械臂对于AUV本体的耦合干扰,并通过直接补偿的方法抵消了水下机械臂对于AUV本体的影响;4)基于AUV的误差动力学模型设计了AUV抗扰控制器,通过神经网络控制来补偿AUV的结构性的不确定性,自适应控制补偿AUV的非结构性的不确定性和水下机械臂的估算误差,误差增益控制项减少三维空间轨迹和姿态跟踪过程中的误差,完成水下定点作业过程中的AUV的运动控制任务;5)将AUV和水下机械臂的控制器进行有机整合,并设置仿真条件来模仿UVMS在水下定点作业中的运动状态,研究了其整体的控制性能。

1 UVMS运动学建模

AUV的动力系统采用单推进器和十字舵组合的方式,能够实现前进、转艏、俯仰等运动,是一种欠驱动的水下机器人系统。水下机械臂由两个回转关节和两个摆动关节和一个机械手抓组成,是一个四自由度的水下机械臂。

建立AUV的惯性坐标系如图1所示,这里取海面上的任意一点为原点建立惯性坐标系 $O-xyz$,引入载体坐标系 $O_b-x_b y_b z_b$,将载体坐标系与AUV相固连,伴随AUV在水下自由运动,取AUV的浮心位置为原点 O_b 。为了方便,将载体坐标系的 $O_b x_b$ 轴直接取在AUV的主对称轴的方向

上, $O_b z_b$ 轴垂直于AUV本体底部,方向向下,根据右手定则, $O_b y_b$ 轴与AUV辅对称轴取向一致且指向AUV的右舷。

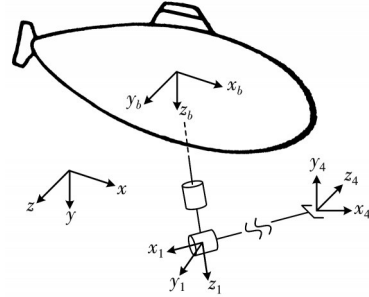


图1 UVMS系统建模

Fig. 1 Modeling of UVMS system

$[u \ v \ w]^T$ 是载体坐标系原点线速度在 x_b 、 y_b 和 z_b 轴上的投影, $[p \ q \ r]^T$ 是载体坐标系原点的角速度在 x_b 、 y_b 和 z_b 轴上的投影。 $[x \ y \ z]^T$ 和 $[\phi \ \theta \ \psi]^T$ 是AUV在惯性坐标系下的位置和姿态信息。设 $\eta_1=[x \ y \ z]^T$, $\eta_2=[\phi \ \theta \ \psi]^T$, $v_1=[u \ v \ w]^T$, $v_2=[p \ q \ r]^T$, $q=[q_1, q_2, q_3, q_4]^T$ 。

定义惯性坐标系下UVMS各个关节的位置向量为 $\eta=[\eta_1^T, \eta_2^T, q^T]^T$,各个关节的速度为 $\zeta=[v_1^T, v_2^T, \dot{q}^T]^T$,可以得到UVMS关节的空间运动学模型为

$$\zeta = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_I^B & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 4} \\ 0_{3 \times 3} & J_2^{-1}(\eta_2) & 0_{3 \times 4} \\ 0_{4 \times 3} & 0_{4 \times 3} & I_{4 \times 4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \\ \dot{q} \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \\ \dot{q} \end{bmatrix},$$

式中: $I_{4 \times 4}$ 是单位矩阵; $0_{3 \times 4}$ 和 $0_{4 \times 3}$ 是零矩阵。

$$R_I^B(\eta_2) =$$

$$\begin{bmatrix} c\psi c\theta & c\theta s\psi & -s\theta \\ -c\phi s\psi + s\phi s\theta c\psi & c\phi c\psi + s\phi s\theta s\psi & s\phi c\theta \\ s\phi s\psi + c\phi s\theta c\psi & -s\phi c\psi + c\phi s\theta s\psi & c\phi c\theta \end{bmatrix},$$

$$J_2(\eta_2)^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -s\theta \\ 0 & c\phi & c\theta s\phi \\ 0 & -s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix},$$

式中: $s(\cdot) = \sin(\cdot)$, $c(\cdot) = \cos(\cdot)$ 。

2 误差动力学模型

2.1 模型简化

忽略横摇对AUV运动的影响,简化AUV的数学模型,可得AUV五自由度的运动学为^[5]

$$\begin{aligned} \dot{x} &= u \cos \phi \cos \theta - v \sin \phi + w \sin \theta \cos \phi, \\ \dot{y} &= u \sin \phi \cos \theta + v \cos \phi + w \sin \theta \sin \phi, \\ \dot{z} &= -u \sin \theta + w \cos \theta, \\ \dot{\theta} &= q, \dot{\phi} = r. \end{aligned} \quad (1)$$

2.2 误差受限动力学模型

由简化的运动学模型可得 AUV 动力学模型为

$$\begin{aligned} m_{11}\dot{u} &= m_{22}vr - m_{33}\omega q - d_{11}u - f_u(u) + \tau_u + \tau_{wu} + f_{mu}, \\ m_{22}\dot{v} &= -m_{11}ur - d_{22}v - f_v(v) + \tau_v + f_{mv}, \\ m_{33}\dot{\omega} &= m_{11}uq - d_{33}\omega - f_w(\omega) + \tau_w + f_{mw}, \\ m_{55}\dot{q} &= (m_{33} - m_{11})u\omega - d_{55}q - f_q(q) - (z_g W - z_b B) \sin \theta + \tau_q + \tau_{wq} + \tau_{mq}, \\ m_{66}\dot{r} &= (m_{11} - m_{22})uv - d_{66}r - f_r(r) + \tau_r + \tau_{wr}, \end{aligned} \quad (2)$$

式中： $m_{11} = m - X_{\dot{u}}$, $m_{22} = m - Y_{\dot{v}}$, $m_{33} = m - Z_{\dot{w}}$, $m_{55} = I_y - M_{\dot{q}}$, $m_{66} = I_z - N_{\dot{r}}$; $d_{11} = X_u + X_{u|u}|u|$, $d_{55} = M_q + M_{q|q}|q|$, $d_{66} = N_r + N_{r|r}|r|$; $f_u(u)$, $f_v(v)$, $f_w(\omega)$, $f_q(q)$ 和 $f_r(r)$ 为 AUV 动力学方程的未建模动态和高阶非线性项; τ_{wu} , τ_{wv} , $\tau_{w\omega}$, τ_{wq} 和 τ_{wr} 为海流引起的有界干扰信号; f_{mu} 和 τ_{mq} 为机械臂对 AUV 本体的干扰。

根据有驱动和无驱动的方向, AUV 的动力学方程可以分为两个部分

$$\begin{bmatrix} M_D & C_D(v_n) & D_D & F_D(v_D) & G_D(\theta) & \tau_{w1}(t) & \tau_{m1} \\ M_P & C_P(v_D) & D_P & F_P & \tau_{w2}(t) & \tau_{m2} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{v}_D & v_D & v_D & 1 & 1 & 1 & 1 \\ \dot{v}_P & v_D & v_D & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \tau_D(t) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中： $v_D = [u \ q \ r]^T$ 为驱动方向上的速度向量; $v_P = [v \ \omega]$ 为无驱动方向上的速度向量。

假设 1: 欠驱动 AUV 的位姿信息可由传感器实时测得并进行反馈。

假设 2: AUV 的期望轨迹、期望轨迹的导数及其二阶导数, 即 $x_d, y_d, z_d, \dot{x}_d, \dot{y}_d, \dot{z}_d, \ddot{x}_d, \ddot{y}_d$ 和 \ddot{z}_d 是有界且连续的。

假设 3: AUV 外部干扰信号有界, 即 $|\tau_{wu}| < \lambda_{wu}$, $|\tau_{wq}| < \lambda_{wq}$, $|\tau_{wr}| < \lambda_{wr}$, $|\tau_{wv}| < \lambda_{wv}$ 和 $|\tau_{w\omega}| < \lambda_{w\omega}$, 其中, λ_{wu} , λ_{wq} , λ_{wr} , λ_{wv} 和 $\lambda_{w\omega}$ 为未知正常数。

假设 4: AUV 的俯仰角满足 $|\theta(t)| < \frac{\pi}{2}, \forall t > 0$, 避免闭环系统发生奇异。因为 AUV 自身存在

恢复力矩, 所以 $\theta(t)$ 不会接近 $|\theta(t)| = \pm \frac{\pi}{2}$ 的邻域, $|\theta(t)| \leq \theta_{\max} < \frac{\pi}{2}, \forall t > 0$ 。

假设 5: AUV 在无驱动方向上的侧移和升沉速度是有界的, 即 $v(t)$ 和 $w(t)$ 满足 $\sup_{t \geq 0} |v(t)| < \lambda_v, \forall t > 0$ 和 $\sup_{t \geq 0} |w(t)| < \lambda_w, t > 0$ 。

注 1: 本文中的 AUV 推进器动力学作用作为未建模动态。

注 2: 由于 AUV 自身存在恢复力矩且横摇方向上不存在执行器, 为简化 AUV 的控制器设计, 故不考虑横摇方向的 AUV 运动学和动力学方程。

本文的控制目标是设计欠驱动的 AUV 控制输入, 在 AUV 的动力学模型存在机械臂耦合干扰、AUV 结构性不确定性和海流干扰等非结构性不确定性的情况下, 使得 AUV 三维空间的轨迹跟踪误差收敛到原点, 且满足预先设定的动态性能。根据视线法, 定义基于虚拟向导的跟踪误差, 如式(4)所示, 其示意图如图 2 所示。

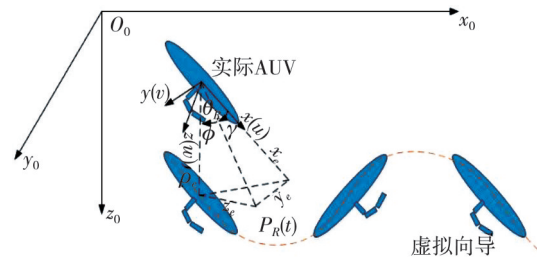


图 2 AUV 三维空间轨迹跟踪框图
Fig. 2 Block diagram of AUV 3D space trajectory tracking

$$\rho_e^2 = x_e^2 + y_e^2 + z_e^2, \gamma = \arctan\left(\frac{y_e}{x_e}\right),$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{z_e}{\sqrt{x_e^2 + y_e^2}}\right). \quad (4)$$

假设 6: 该 AUV 搭载传感器, 可以实时测得实际 AUV 和虚拟向导之间的距离 ρ_e 、姿态误差 ϕ 和 γ 。

由图 2 可知, AUV 跟踪的位置误差 (x_e, y_e 和 z_e)与 AUV 基于虚拟向导的跟踪误差 (ρ_e, γ 和 ϕ)存在如下几何关系:

$$\begin{aligned} x_e &= \rho_e \cos \phi \cos \gamma, y_e = \rho_e \cos \phi \sin \gamma, \\ z_e &= \rho_e \sin \phi. \end{aligned} \quad (5)$$

为了方便设计, 实际 AUV 和虚拟向导在惯性坐标下的距离和姿态误差可以转换到 AUV 的载体坐标系上, 即,

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \cos \theta \sin \psi & -\sin \theta \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ \sin \theta \cos \psi & \sin \theta \sin \psi & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_d \\ y - y_d \\ z - z_d \end{bmatrix} \quad (6)$$

基于虚拟向导的跟踪误差的导数可表示为

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_e &= (x_e \dot{x}_e + y_e \dot{y}_e + z_e \dot{z}_e) / \rho_e, \\ \dot{\gamma} &= \frac{x_e y_e + x_e y_e}{x_e^2 + y_e^2}, \\ \dot{\phi} &= \frac{\dot{z}_e (x_e^2 + y_e^2) + z_e (x_e \dot{x}_e + y_e \dot{y}_e)}{(x_e^2 + y_e^2 + z_e^2) \sqrt{x_e^2 + y_e^2}}. \end{aligned} \quad (7)$$

为了使跟踪误差按照设定的动态和静态性能收敛,对跟踪误差设定如下:

$$\begin{aligned} a_1 \xi_1(t) &< \rho_e(t) < b_1 \xi_2(t), \\ -a_2 \xi_2(t) &< \phi(t) < b_2 \xi_2(t), \\ -a_3 \xi_3(t) &< \gamma(t) < b_3 \xi_3(t), \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $b_1 > a_1$, a_2 , b_2 , a_3 和 b_3 为正常数; $\xi_i(t)$ ($i = 1, 2, 3$) 为单调递减函数, 其形式设计为

$$\xi_i(t) = (\xi_{i0} - \xi_{i\infty}) e^{-\lambda_i t} + \xi_{i\infty} \quad (9)$$

为了实现控制目标和确保跟踪误差的设定的动态和静态性能,设计3个严格递增函数 $y_1(\epsilon_{\rho_e})$, $y_2(\epsilon_{\phi})$ 和 $y_3(\epsilon_{\gamma})$, $\epsilon_{\rho_e}, \epsilon_{\phi}, \epsilon_{\gamma} \in L_{\infty}$, 且满足如下性质:

$$\begin{aligned} a_1 &< y_1(\epsilon_{\rho_e}) < b_1, \quad -a_2 < y_2(\epsilon_{\phi}) < b_2, \\ -a_3 &< y_3(\epsilon_{\gamma}) < b_3; \\ \lim_{\epsilon_{\rho_e} \rightarrow \infty} y_1(\epsilon_{\rho_e}) &= b_1, \quad \lim_{\epsilon_{\phi} \rightarrow \infty} y_2(\epsilon_{\phi}) = b_2, \\ \lim_{\epsilon_{\gamma} \rightarrow \infty} y_3(\epsilon_{\gamma}) &= b_3, \quad \lim_{\epsilon_{\rho_e} \rightarrow -\infty} y_1(\epsilon_{\rho_e}) = a_1, \\ \lim_{\epsilon_{\phi} \rightarrow -\infty} y_2(\epsilon_{\phi}) &= -a_2, \quad \lim_{\epsilon_{\gamma} \rightarrow -\infty} y_3(\epsilon_{\gamma}) = -a_3; \end{aligned}$$

$$y_1(0) = a_1 + \epsilon_1, y_2(0) = 0, y_3(0) = 0.$$

函数 $y_1(\epsilon_{\rho_e})$, $y_2(\epsilon_{\phi})$ 和 $y_3(\epsilon_{\gamma})$ 应为

$$\begin{aligned} y_1(\epsilon_{\rho_e}) &= \frac{b_1 e^{p_1 \epsilon_{\rho_e} + v_1} + \alpha_1 e^{-(p_1 \epsilon_{\rho_e} + v_1)}}{e^{(p_1 \epsilon_{\rho_e} + v_1)}}, \\ y_2(\epsilon_{\phi}) &= \frac{b_2 e^{p_2 \epsilon_{\phi} + v_2} + \alpha_2 e^{-(p_2 \epsilon_{\phi} + v_2)}}{e^{(p_2 \epsilon_{\phi} + v_2)} + e^{-(p_2 \epsilon_{\phi} + v_2)}}, \\ y_3(\epsilon_{\gamma}) &= \frac{b_3 e^{p_3 \epsilon_{\gamma} + v_3} + \alpha_3 e^{-(p_3 \epsilon_{\gamma} + v_3)}}{e^{(p_3 \epsilon_{\gamma} + v_3)} + e^{-(p_3 \epsilon_{\gamma} + v_3)}}. \end{aligned} \quad (10)$$

$v_1 = 0.5 \ln(\epsilon_1 / (b_1 - a_1 - \epsilon_1))$, $v_2 = 0.5 \ln(a_1 / b_1)$ 和 $v_3 = 0.5 \ln(a_3 / b_3)$, 且 $p_i > 0$, $i = 1, 2, 3$ 为常数。

令 $\rho_e = \xi_1 y_1(\epsilon_{\rho_e})$, $\phi = \xi_2 y_2(\epsilon_{\phi})$, $\gamma = \xi_3 y_3(\epsilon_{\gamma})$ 因为 $\xi_1(t)$, $\xi_2(t)$, $\xi_3(t)$, $y_1(\epsilon_{\rho_e})$, $y_2(\epsilon_{\phi})$ 和 $y_3(\epsilon_{\gamma})$ 为

单调递增函数, 且 $\xi_1, \xi_2, \xi_3 \neq 0$, 所以, $\epsilon_{\rho_e} = y_1^{-1}(\rho_e(t) / \xi_1(t))$, $\epsilon_{\phi} = y_2^{-1}(\phi(t) / \xi_2(t))$, $\epsilon_{\gamma} = y_3^{-1}(\gamma / \xi_3 \phi(t) / \xi_2(t))$ 存在, 具体形式为

$$\begin{aligned} \epsilon_{\rho_e} &= 0.5 p_1^{-1} \ln\left(\frac{\rho_e}{\xi_1} - a_1\right) + 0.5 p_1^{-1} \times \\ &\ln\left(b_1 - a_1 - \epsilon_1\right) - 0.5 p_1^{-1} \ln\left(b_1 \epsilon_1 - \frac{\rho_e}{\xi_1}\right), \\ \epsilon_{\phi} &= 0.5 p_2^{-1} \ln\left(\frac{\phi}{\xi_2} b_2 + a_2 b_2\right) - \\ &0.5 p_2^{-1} \ln\left(a_2 b_2 - \frac{\phi}{\xi_2} a_2\right), \\ \epsilon_{\gamma} &= 0.5 p_3^{-1} \ln\left(\frac{\gamma}{\xi_3} b_3 + a_3 b_3\right) - \\ &0.5 p_3^{-1} \ln\left(a_3 b_3 - \frac{\gamma}{\xi_3} a_3\right). \end{aligned} \quad (11)$$

定义新的误差向量 $\kappa_e = [\epsilon_{\rho_e} \quad \epsilon_{\phi} \quad \epsilon_{\gamma}]^T$, 那么, $\dot{\kappa}_e = [\dot{\epsilon}_{\rho_e} \quad \dot{\epsilon}_{\phi} \quad \dot{\epsilon}_{\gamma}]^T$, 则可得到

$$\dot{\kappa}_e = R(\kappa_e) v_D + \Delta(v_D, \dot{x}_d, \dot{y}_d, \dot{z}_d, \kappa_e). \quad (12)$$

由式(12)可以得到 v_D 和 \dot{v}_D 为

$$\begin{cases} v_D = R^{-1}(\kappa_e) \dot{\kappa}_e - R^{-1}(\kappa_e) \Delta(v_D, \dot{x}_d, \dot{y}_d, \dot{z}_d, \kappa_e), \\ \dot{v}_D = R^{-1}(\kappa_e) \ddot{\kappa}_e - R^{-1}(\kappa_e) \dot{R}(\kappa_e) v_D + R^{-1}(\kappa_e) \cdot \\ \quad \dot{\Delta}(v_D, \dot{x}_d, \dot{y}_d, \dot{z}_d, \kappa_e). \end{cases} \quad (13)$$

将式(13)代入到式(3)中第一个部分, 两边乘以 $R^{-T}(\kappa_e)$, 得到转换后的误差动力学方程为

$$M(\kappa_e) \ddot{\kappa}_e + C(\kappa_e, \dot{\kappa}_e) \dot{\kappa}_e + D(\kappa_e) \dot{\kappa}_e - \zeta_1 - \zeta_2 = R^{-T}(\kappa_e) \tau_D, \quad (14)$$

式中: ζ_1 包含结构性和非结构性的AUV系统的不确定性; ζ_2 为转换后机械臂对AUV本体的耦合干扰。

3 误差受限抗扰控制

3.1 水下机械臂干扰力矩补偿

水下机械臂在运动时,会对AUV本体的姿态产生干扰,使得AUV偏离期望的轨迹,为了抵消水下机械臂对AUV本体位置和姿态的干扰,需要对AUV本体所受水下机械臂的干扰进行估计及实时补偿。因为本文的AUV为欠驱动水下机器人,在横摇方向上没有驱动,所以水下机械臂的腰部回转关节在运动时会对AUV在横摇方向产生干扰,使AUV失去控制,为了保证AUV系统

的可控性,使AUV腰部关节保持静止状态,大臂和小臂关节只可以在AUV的纵倾面上运动,此时的水下机械臂可以退化成纵倾面上的二自由度机械臂,通过Newton-Eular公式推导得出水下机械臂对于AUV本体的扰动力矩。

前向递归为

$$\begin{aligned} {}^{i+1}\omega_{i+1} &= {}^{i+1}R^i\omega_i + \dot{\theta}_{i+1}^i\hat{Z}_{i+1}, \\ {}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} &= {}^{i+1}R^i\dot{\omega}_i + {}^{i+1}R^i\omega_i \times \dot{\theta}_{i+1}^i\hat{Z}_{i+1} + \theta_{i+1}^{i+1}\hat{Z}_i, \\ & {}^{i+1}\dot{v}_{i+1} = \\ & {}^{i+1}R^i({}^i\dot{\omega}_i \times {}^iP_{i+1} + {}^i\omega_i \times ({}^i\omega_i \times {}^iP_{i+1}) + {}^i\dot{v}_i), \\ & {}^{i+1}F_{i+1} = m_{i+1}^{i+1}\dot{v}_{i+1}, \\ {}^{i+1}N_{i+1} &= {}^{c_{i+1}}I_{i+1}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} + {}^{i+1}\omega_{i+1} \times {}^{c_{i+1}}I_{i+1}^{i+1}\omega_{i+1}. \end{aligned}$$

后向递归为

$$\begin{aligned} {}^if_i &= {}^{i+1}R^{i+1}f_{i+1} + {}^iF_i, \\ {}^in_i &= {}^iN_i + {}^{i+1}R^{i+1}n_{i+1} + {}^iP_{C_i} \times {}^iF_i + \\ & {}^iP_{i+1} \times {}^{i+1}R^{i+1}, \\ \tau_i &= {}^in_i^T \hat{Z}_{i0}. \end{aligned}$$

下面分析水下机械臂对AUV本体的耦合扰动,为方便起见,假设水下机械臂连杆1和2的质量分别为 m_1 和 m_2 ,质心位于连杆中心位置,令 l_1, l_2 为两连杆质心到关节轴之间的距离, L_1 和 L_2 为两连杆的长度,连杆1和2的惯性可以表示为 $I_1 = m_1 l_1^2/3$ 和 $I_2 = m_2 l_2^2/3$,连杆1和2的重心及其末端可以表示为向量形式 ${}^1r_{C_1} = l_1 \hat{X}_1, {}^1r_{C_2} = l_2 \hat{X}_2, {}^1r_2 = l_1 \hat{X}_1$ 和 ${}^2r_3 = l_2 \hat{X}_2$,通过编码器测得机械臂两个关节的转角为 \hat{q}_1 和 \hat{q}_2 。

通过后向递归可以计算出水下机械臂末端不夹持物体和夹持物体对机械臂基座的作用力,为了方便分析水下机械臂对AUV本体的干扰和简化计算,将水下机械臂的基座坐标系放在AUV载体坐标系的正下方,水下机械臂的基座坐标系的原点在AUV载体坐标系下表示为 ${}^0r_B = [{}^0p_{Bx} \ {}^0p_{By} \ {}^0p_{Bz}]^T$,其中, ${}^0p_{Bx} = 0, {}^0p_{By} = 0$,则水下机械臂对AUV本体的耦合干扰为

$${}^Bf_M = {}^B_0R^0f_1 = \begin{bmatrix} {}^0f_{1y} \\ {}^0f_{1z} \\ {}^0f_{1x} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$${}^B\mu_M = {}^B_0R^0\mu_1 + {}^0r_B \times {}^Bf_M = \begin{bmatrix} 0 \\ {}^0p_{Bz} {}^0f_{1y} + {}^0\mu_{1z} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

水下机械臂对AUV本体的耦合干扰作用可以

估计为 $\hat{d}_m = [{}^Bf_M^T \ {}^B\mu_M^T]^T$,为了抵消水下机械臂对AUV本体位姿的影响,采用前馈补偿的方式抵消水下机械臂对AUV的干扰,令 $\hat{\tau}_{mq} = [{}^0f_{1y} \ -{}^0p_{Bz} \ {}^0f_{1y} \ -{}^0\mu_{1z} \ 0]$,在AUV抗扰控制器中直接进行补偿,因为并没有考虑水动力、传感器测量误差及信息传输延迟和欠驱动补偿的不对称性等因素,所以机械臂耦合干扰估计存在误差,并不能完全消除水下机械臂对AUV影响,估计误差需要利用鲁棒控制算法在系统闭环中消除。

3.2 AUV抗扰控制器设计

基于转换后的AUV误差动力学方程设计的抗扰控制器为

$$M^{-1}(\kappa_e)\ddot{\kappa}_e = R^{-T}(\kappa_e)\tau_D - C(\kappa_e, \dot{\kappa}_e)\dot{\kappa}_e - D(\kappa_e)\dot{\kappa}_e + \zeta_1 + \zeta_2. \quad (17)$$

定义新的误差变量 $e_\kappa = \dot{\kappa}_e + \Lambda\kappa_e$,其中, $\Lambda = \Lambda^T > 0$,且 $\Lambda, \Lambda^T \in R^3$ 为正对角增益矩阵。AUV的抗扰控制器设计为

$$\tau_D = R^T(\kappa_e)(-K_1\kappa_e - K_2\dot{\kappa}_e - \tau_{nc} - \tau_{ac} - \hat{\tau}_{mq}), \quad (18)$$

式中: $K_1 \in R^{3 \times 3}$ 和 $K_2 \in R^{3 \times 3}$ 为正定对角增益矩阵; τ_{nc} 为神经网络控制项,用于补偿转换后的AUV误差动力学方程中的由海流干扰引起的不确定性项 ζ_{1m} ; τ_{ac} 为自适应控制项,用于补偿转换后的AUV误差动力学方程的结构性不确定项 ζ_{1p} ; $\hat{\tau}_{mq}$ 为机械臂耦合干扰的前馈补偿项 ζ_{20} 。AUV抗扰控制器的框图如图3所示。

神经网络具有良好的泛化能力,能在一个紧凑集和任意精度下,逼近任意非线性函数,因此选用神经网络估计结构性不确定性 ζ_{1p} ,表示为

$$\zeta_{1p} = W^T h_1(V^T x) + \varepsilon(x), \quad (19)$$

式中: $W^T \in R^{n_3 \times (n_2+1)}$, $V^{n_2 \times (n_1+1)}$ 为理想的神经网络权值矩阵; n_1, n_2 和 n_3 分别为神经网络层、隐藏层和输出层的节点数; $\varepsilon(x)$ 为网络的逼近误差; $h(V^T x) = [1, \bar{h}_1(V_{r_1}^T x), \dots, \bar{h}_2(V_{r_{n_2}}^T x)]^T$ 为神经网络的高斯基函数输出; x 为网络输入向量。

神经网络控制项表示为

$$\tau_{nc} = \hat{W}^T h_1(\hat{V}x). \quad (20)$$

权值矩阵 \hat{W} 、 \hat{V} 可以通过如下的自适应律进行实时更新。

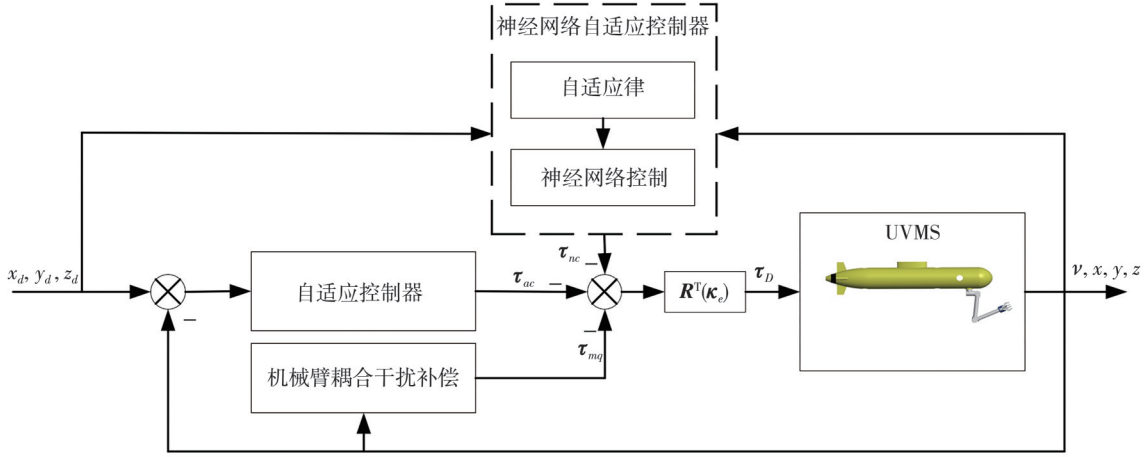


图3 AUV抗扰控制器框图

Fig. 3 Block diagram of AUV disturbance rejection controller

$$\begin{aligned}\dot{\hat{W}} &= \Gamma_w (h_1(\hat{V}x) - h_1'(\hat{V}x)\hat{V}^T x) e_\kappa^T - \sigma_w \Gamma_w \hat{W}, \\ \dot{\hat{V}} &= \Gamma_v x e_\kappa^T \hat{W}^T h_1'(\hat{V}x)^T - \sigma_v \Gamma_v \hat{V},\end{aligned}\quad (21)$$

式中: $\Gamma_w = \Gamma_w^T > 0$, 且 $\Gamma_w, \Gamma_w^T \in R^{(n_2+1) \times (n_2+1)}$, $\Gamma_v = \Gamma_v^T > 0$, 且 $\Gamma_v, \Gamma_v^T \in R^{(n_1+1) \times (n_1+1)}$, Γ_w 和 Γ_v 均为对角增益矩阵; $h_1'(\hat{V}x) = [0_{n_2 \times 1}, \text{diag}[h'_{11}, h'_{12}, \dots, h'_{1n_2}]]^T$; $h'_{1i} = \frac{d\bar{h}_1}{ds} \Big|_{s=(\hat{V}x)^T \hat{V}x}$, $i=1, 2, \dots, n_2$ 。

假设 7: 神经网络的理想权值矩阵 W 和 V 有界, 即 $\|W\| \leq c_5$ 和 $\|V\| \leq c_6$, c_5 和 c_6 为未知正常数。

假设 8: 神经网络的估计误差有界, 即 $\epsilon(x) < c_7$, 且为未知正常数。

由于海流干扰、传感器测量误差和时延等因素的影响, 上文提出的水下机械臂干扰力矩补偿 $\hat{\tau}_{mq}$ 无法完全补偿水下机械臂对于 AUV 本体在运动过程的干扰, 所以定义前馈补偿机械臂耦合干扰误差 $\tilde{d}_m = \hat{\tau}_{mq} - \zeta_2$, 并且假设 \tilde{d}_m 有界, 即 $\tilde{d}_m \leq d_M$, d_M 为未知正常数。

采用自适应鲁棒控制项 τ_{ac} 补偿由外部海流干扰引起的非结构性误差 ζ_{in} 、神经网络的逼近误差 ϑ 和前馈补偿机械臂耦合干扰误差 \tilde{d}_m , $\|\zeta_n + \vartheta + \tilde{d}_m\|$ 的上界为

$$\begin{aligned}\|\zeta_n + \vartheta + \tilde{d}_m\| &\leq \theta_1 \|\hat{W}^T h_1'(\hat{V}^T x)\| \|x\| + \\ &\theta_2 \|h_1'(\hat{V}^T x)\hat{V}^T x\| + \theta_3 \|R^{-T}(\kappa_e)\| + \theta_4,\end{aligned}\quad (22)$$

式中: $\theta_i, i=1, \dots, 4$ 为未知正常数。

为了方便表示, 令 $\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4]^T$, $H_2 = \left[\|\hat{W}^T h_1'(\hat{V}^T x)\| \times \|x\| \ \|h_1'(\hat{V}^T x)\hat{V}^T x\| \|R^{-T}(\kappa_e)\| \ 1 \right]$, 则

式(22)可写成 $h_2 = H_2 \theta$, θ 的估计值 $\hat{\theta}$ 可以通过自适应律进行在线更新, 即,

$$\dot{\hat{\theta}} = \Gamma_\theta H_2^T \|e_\kappa\| - \delta_\theta \Gamma_\theta \hat{\theta},\quad (23)$$

式中: $\Gamma_\theta = \Gamma_\theta^T > 0$, 且 $\Gamma_\theta, \Gamma_\theta^T \in R^{4 \times 4}$, Γ_θ 为对角增益矩阵; $\delta_\theta \in R$ 为正常数。

设定 $\hat{h}_2 = H_2 \hat{\theta}$, \hat{h}_2 为 $\zeta_n + \vartheta$ 边界的估计值, 设计自适应鲁棒控制项为

$$\tau_{ac} = \hat{h}_2^2 \kappa_e / (\hat{h}_2 \|\kappa_e\| + \epsilon_2),\quad (24)$$

式中: ϵ_2 为正常数, 且与 AUV 系统的跟踪误差精度和控制带宽有关。

3.3 控制器稳定性分析

基于式(1)的 AUV 运动学模型、式(2)的 AUV 动力学模型和式(17)的变换后的 AUV 误差动力学模型, 设定假设 1~8 成立和式(8)的初始条件存在, 证明提出的控制器可以有效保证, 当 $t \rightarrow \infty$, $\rho_e(t)$ 、 $\phi(t)$ 和 $\gamma(t)$ 半全局一致终端有界, 趋近于原点附近的小邻域内, 且满足设定性能, 下面给出详细的证明过程。

定义 Lyapunov 函数为

$$\begin{aligned}V(t) &= \frac{1}{2} e_\kappa^T M(\kappa_e) e_\kappa + \frac{1}{2} \kappa_e^T K_\kappa \kappa_e + \\ &\frac{1}{2} \text{tr} \{ \tilde{W}^T \Gamma_V^{-1} \tilde{W} \} + \frac{1}{2} \text{tr} \{ \tilde{V}^T \Gamma_V^{-1} \tilde{V} \} + \frac{1}{2} \tilde{\theta}^T \Gamma_\theta^{-1} \tilde{\theta},\end{aligned}\quad (25)$$

式中: $\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta}$ 。

为了方便证明系统的稳定性, 作如下定义:

1) $\min \{ \Gamma_w^{-1} \}$, $\min \{ \Gamma_v^{-1} \}$ 和 $\min \{ \Gamma_\theta^{-1} \}$ 为矩阵 Γ_w^{-1} , Γ_v^{-1} 和 Γ_θ^{-1} 对角线上最小的元素, $\max \{ \Gamma_w^{-1} \}$, $\max \{ \Gamma_v^{-1} \}$ 和 $\max \{ \Gamma_\theta^{-1} \}$ 为矩阵 Γ_w^{-1} ,

Γ_V^{-1} 和 Γ_θ^{-1} 对角线上最大的元素;

2) $\min \{K_\kappa\}$ 和 $\min \{K_e \Lambda\}$ 为矩阵 K_κ 和 $K_e \Lambda$ 中对角线上的最小的元素;

3) $x_v(t) = [\kappa_e^T, e_k^T, \tilde{w}_{11}, \dots, \tilde{w}_{(n_2+1)n_3}, \hat{v}_{11}, \dots, \hat{v}_{(n_1+1)n_2}, \tilde{\theta}^T]^T$;

4) $\lambda_x = 0.5 \min \{k_{\kappa 1}, k_{\kappa 2}, k_{\kappa 3}, \lambda_{\min}\}$;

5) $\lambda_{ud} = 0.5 \min \{k_{\kappa 1}, k_{\kappa 2}, k_{\kappa 3}, \lambda_{\max}, \max \Gamma_W^{-1}\}$, $\max \{\Gamma_V^{-1}\}, \max \{\Gamma_\theta^{-1}\}$;

6) $\lambda_{up} = 0.5 \max \{k_{\kappa 1}, k_{\kappa 2}, k_{\kappa 3}, \lambda_{\max}, \max \{\Gamma_W^{-1}\}, \max \{\Gamma_V^{-1}\}, \max \{\Gamma_\theta^{-1}\}\}$ 。

式(25)定义的李雅普诺夫函数是正定有界的, 显然满足不等式

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & \kappa_e^T K_\kappa \dot{\kappa}_e + e_k^T M(\kappa_e) \dot{e}_k + e_\kappa^T \dot{M}(\kappa_e) \dot{e}_\kappa - \text{tr} \left\{ \tilde{W}^T \Gamma_W^{-1} \dot{\tilde{W}} \right\} - \tilde{\theta}^T \Gamma_\theta^{-1} \dot{\tilde{\theta}} - \text{tr} \left\{ \tilde{V}^T \Gamma_V^{-1} \dot{\tilde{V}} \right\} = \\ & \kappa_e^T K_\kappa \dot{\kappa}_e + e_k^T \left(-K_\kappa e_\kappa - K_e \kappa_e + \tilde{W} (h_1(\hat{V}^T) x + \vartheta + \zeta_{1n} + \tilde{d}_{mq} + \Theta) e_k^T \left(-h_1'(\hat{V}^T x) (\hat{V}^T x) - \frac{\hat{h}_2^2 e_\kappa}{\hat{h}_2 \|e_\kappa\| + \varepsilon_2} \right) - \right. \\ & \kappa_e^T C(\kappa_e, \dot{\kappa}_e) e_\kappa - \text{tr} \left\{ \tilde{W}^T \Gamma_W^{-1} \dot{\tilde{W}} \right\} - \text{tr} \left\{ \tilde{V}^T \Gamma_V^{-1} \dot{\tilde{V}} \right\} + \hat{W}^T h_1'(\hat{V}^T x) \tilde{V}^T x - \tilde{\theta}^T \Gamma_\theta^{-1} \dot{\tilde{\theta}} - \kappa_e^T D(\kappa_e) e_\kappa = \\ & \kappa_e^T K_\kappa \dot{\kappa}_e - e_k^T K_\kappa e_\kappa - e_\kappa^T K_e \kappa_e + e_\kappa^T \tilde{W} (h_1(\hat{V}^T x) + e_k^T \hat{W}^T h_1'(\hat{V}^T x) \tilde{V}^T x - h_1'(\hat{V}^T x) \hat{V}^T x) - \\ & \left. \frac{\hat{h}_2^2 e_\kappa^T e_\kappa}{\hat{h}_2 \|e_\kappa\| + \varepsilon_2} + e_k^T \Theta - \text{tr} \left\{ \tilde{W}^T \Gamma_W^{-1} \dot{\tilde{W}} \right\} - \tilde{\theta}^T \Gamma_\theta^{-1} \dot{\tilde{\theta}} - \text{tr} \left\{ \tilde{V}^T \Gamma_V^{-1} \dot{\tilde{V}} \right\} - \kappa_e^T D(\kappa_e) e_\kappa + e_k^T (\vartheta + \zeta_{1n} + \tilde{d}_{mq}) \right) \end{aligned} \quad (28)$$

考虑到 $\frac{\varepsilon_2 \hat{h}_2 \|e_\kappa\|}{\|e_\kappa\| + \varepsilon_2} \leq \varepsilon_2$, 将自适应律式(21)和

式(23)代入式(28)中, 应用Rayleigh-Ritz不等式有

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) \leq & (\min \{K_\kappa\} + \lambda_d) \|e_k\|^2 - \min \{K_e \Lambda\} \|\kappa_e\|^2 + \\ & \delta_w \text{tr} \left\{ \tilde{W}^T \dot{\tilde{W}} \right\} + \delta_v \text{tr} \left\{ \tilde{V}^T \dot{\tilde{V}} \right\} + \delta_\theta \tilde{\theta}^T \dot{\tilde{\theta}} + e_\kappa^T \Theta + \varepsilon_{2o} \end{aligned} \quad (29)$$

定理 1 由文献[23]可知, $\forall x, y \in R^n, N^T = N > 0, k > 0$, 且 $k \in R$, 有如下不等式成立:

1) $\text{tr} \{x^T y\} \leq 0.5 \|x\|^2 / k^2 + 0.5 k^2 \|y\|^2$

2) $x^T N y \leq 0.5 \lambda_{\min} \{N\} \|x\|^2 / k^2 + 0.5 k^2 \lambda_{\max} \{N\} \|y\|^2$ 。

基于定理1, 容易得到

$$\begin{aligned} \delta_w \text{tr} \left\{ \tilde{W}^T \dot{\tilde{W}} \right\} \leq & -\delta_w \left(1 - \frac{1}{2k^2} \right) \|\tilde{W}\|^2 + \frac{1}{2} \delta_w k^2 \|\tilde{W}\|^2, \\ \delta_v \text{tr} \left\{ \tilde{V}^T \dot{\tilde{V}} \right\} \leq & -\delta_v \left(1 - \frac{1}{2k^2} \right) \|\tilde{V}\|^2 + \frac{1}{2} \delta_v k^2 \|\tilde{V}\|^2, \end{aligned}$$

$$\lambda_x \|x_c(t)\|^2 \leq \lambda_{ud} \|x_v(t)\|^2 \leq V(t) \leq \lambda_{up} \|x_v(t)\|^2 \quad (26)$$

将神经网络控制项、机械臂耦合干扰前馈补偿项和自适应鲁棒控制项结合式(18)代入式(17), 对Lyapunov函数进行求导, 可得

$$\begin{aligned} M(\kappa_e) \dot{e}_\kappa = & -C(\kappa_e \dot{\kappa}_e) e_\kappa - D(\kappa_e) e_\kappa + \zeta_{1p} + \zeta_{1n} + \\ & \zeta_2 - K_1 e_\kappa - K_2 \kappa_e - \tau_{nc} - \tau_{ac} - \hat{\tau}_{mq} + \Theta = \\ & -K_1 e_\kappa - K_2 \kappa_e + \bar{W} (h_1(\hat{V}^T x) - h_1'(\hat{V}^T x) \hat{V}^T x) + \\ & \hat{W}^T h_1'(\hat{V}^T x) \tilde{V}^T x - \frac{\hat{h}_2^2 \kappa_e}{\hat{h}_2 \|e_\kappa\| + \varepsilon_2} + \vartheta + \hat{\zeta}_{1n} + \\ & \tilde{d}_{mq} + \Theta - C(\kappa_e, \dot{\kappa}_e) e_\kappa - D(\kappa_e) e_{\kappa o} \end{aligned} \quad (27)$$

对Lyapunov函数进行求导, 可得

$$\delta_\theta \tilde{\theta}^T \dot{\tilde{\theta}} \leq -\delta_\theta \left(1 - \frac{1}{2k^2} \right) \|\tilde{\theta}\|^2 + \frac{1}{2} \delta_\theta k^2 \|\tilde{\theta}\|^2 \quad (30)$$

令 $\delta_w \left(1 - \frac{1}{2k^2} \right) = \ell_1, \delta_v \left(1 - \frac{1}{2k^2} \right) = \ell_2$ 和 $\delta_\theta \left(1 - \frac{1}{2k^2} \right) = \ell_3$, 将上述三式代入式(29), 结合Young不等式可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) \leq & (\min \{K_\kappa\} + \lambda_d) \|e_k\|^2 - \min \{K_e \Lambda\} \|\kappa_e\|^2 - \\ & \ell_1 \|\tilde{W}\|^2 - \ell_2 \|\tilde{V}\|^2 - \ell_3 \|\tilde{\theta}\|^2 + \frac{1}{2} \delta_w k^2 \|\tilde{W}\|^2 + \\ & \frac{1}{2} \delta_v k^2 \|V\|^2 + \frac{1}{2} \delta_\theta k^2 \|\theta\|^2 + \frac{1}{2} c_5 \|x_e\|^2 + \\ & \frac{1}{2} c_5 \|e_\kappa\|^2 + \frac{1}{2} c_6 \|x_e\|^4 + \frac{1}{2} c_6 \|e_\kappa\|^2 + \varepsilon_{2o} \end{aligned} \quad (31)$$

令 $(\min \{K_\kappa\} + \lambda_d) - 0.5(c_5 + c_6) > 0, \ell_c = \min \{ \min \{K_\kappa\} + \lambda_d - 0.5(c_5 + c_6), \min K_e \Lambda \} \in R$ 和 $\mu = \frac{1}{2} \delta_w k^2 \|W\|^2 + \frac{1}{2} \delta_v k^2 \|V\|^2 + \frac{1}{2} \delta_\theta k^2 \|\theta\|^2 + \varepsilon_2$, 则式(31)可写为

$$\dot{V}(t) \leq -\ell_1 \|\tilde{W}\|^2 - \ell_2 \|\tilde{V}\|^2 - \ell_3 \|\tilde{\theta}\|^2 - \left(\ell_c - \frac{1}{2}c_5 - \frac{1}{2}c_6 \|\mathbf{x}_e\|^2 \right) \|\mathbf{x}_e\|^2 + \mu, \quad (32)$$

取 $\ell_c > \frac{1}{2}c_5 + \frac{1}{2}c_6 \|\mathbf{x}_e\|^2$, $\ell_4 = \ell_c - \frac{1}{2}c_5 - \frac{1}{2}c_6 \|\mathbf{x}_e\|^2 \in \mathbf{R}$, 则式(32)可写为

$$\dot{V}(t) \leq -\ell_1 \|\tilde{W}\|^2 - \ell_2 \|\tilde{V}\|^2 - \ell_3 \|\tilde{\theta}\|^2 - \ell_4 \|\mathbf{x}_e\|^2 + \mu_0. \quad (33)$$

式(33)的简化形式为

$$\dot{V}(t) \leq -\ell_1 \|\mathbf{x}_v\|^2 + \mu \leq -cV(t)/\lambda_{up} + \mu, \quad (34)$$

式中: $\ell = \min\{\ell_1, \ell_2, \ell_3, \ell_4\}$ 。

对式(34)解微分方程可得

$$0 \leq V(t) \leq \lambda_{up}\mu/\ell + (V(t_0) - \lambda_{up}\mu/\ell)e^{-\ell t/\lambda_{up}}, \forall t \in [0, +\infty]. \quad (35)$$

显然, $V(t)$ 满足 $V(t) \leq \max\{V(t_0), -\lambda_{up} \times \mu/\ell\}$, $\forall t \geq 0$, 则有

$$\|\mathbf{x}_v(t)\| \leq \sqrt{\max\{V(t_0), -\lambda_{up}\mu/\ell\}/\lambda_{ud}}. \quad (36)$$

定义一个关于 $\mathbf{x}_v(t)$ 的紧集

$$\Omega_v = \left\{ \mathbf{x}_v(t) \mid 0 \leq \|\mathbf{x}_v(t)\| \leq \sqrt{\max\{V(t_0), -\lambda_{up}\mu/\ell\}/\lambda_{ud}} \right\},$$

当 $\mathbf{x}_v(t)$ 不在紧集 Ω_v 内时, $\dot{V}(t)$ 严格为负, 因此, 当 $\ell_c > \frac{1}{2}c_5 + \frac{1}{2}c_6 \|\mathbf{x}_e\|^2$ 时, $\mathbf{x}_v(t)$ 不在紧集 Ω_v 内, $\mathbf{x}_v(t)$ 是递减的。

由式(34)解的结果容易得到

$$\lambda_x \|\mathbf{x}_e(t)\|^2 \leq V(t) \leq V(0) \leq \lambda_{up} \|\mathbf{x}_v(0)\|^2, \quad \forall t \geq 0, \quad (37)$$

两边除以 λ_x , 则有

$$\|\mathbf{x}_e(t)\|^2 \leq \lambda_{up}/\lambda_x \|\mathbf{x}_v(0)\|^2, \forall t \geq 0. \quad (38)$$

结合式(38), 可得 $\ell_c > \frac{1}{2}c_5 + \frac{1}{2}c_6 \|\mathbf{x}_e\|^2$ 成立的充分条件为

$$\ell_c > \frac{1}{2}c_5 + \frac{1}{2}c_6 \lambda_{up}/\lambda_x \|\mathbf{x}_v(0)\|^2. \quad (39)$$

结合式(39), 定义吸引域

$$D_A = \left\{ \mathbf{x}_v \in \mathbf{R}^{(n_2+1)n_3+(n_1+1)n_2+10} \mid \|\mathbf{x}_v\| < \sqrt{\lambda_x(2\ell_c - c_5)\lambda_{up}} \right\}. \quad (40)$$

综上可知, 可以选择合适的控制参数, 使得

D_A 可以任意大从而包含所有的初始状态, 与此同时, $\mathbf{x}_v(t)$ 是半全局一致终结稳定的, 且逼近于零点的小邻域内, 因此, 跟踪误差 $\mathbf{e}_e^T, \mathbf{\kappa}_e^T \in L_\infty$ 和参数估计误差 $\tilde{\mathbf{w}}_{11}, \dots, \tilde{\mathbf{w}}_{(n_3+1)n_2}, \tilde{\mathbf{v}}_{11}, \dots, \tilde{\mathbf{v}}_{(n_2+1)n_1}, \tilde{\boldsymbol{\theta}} \in L_\infty$ 也是半全局一致终结稳定的, 容易看出 $\hat{\mathbf{\kappa}}_e^T \in L_\infty$ 。由假设7和式(18)基于水下定点作业的AUV抗扰控制器可知 $\varepsilon_\rho, \varepsilon_\phi, \varepsilon_\gamma, \tilde{\mathbf{w}}_{11}, \dots, \tilde{\mathbf{w}}_{(n_3+1)n_2}, \hat{\mathbf{v}}_{(n_2+1)n_1}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \tau_D \in L_\infty$, 因为 $\varepsilon_\rho, \varepsilon_\phi, \varepsilon_\gamma \in L_\infty$, 设定 $a_1 \xi_1(0) < \rho_e(0) < b_1 \xi_2(0)$, $-a_2 \xi_2(0) < \phi(0) < b_2 \xi_2(0)$ 和 $-a_3 \xi_3(t) < \gamma(t) < b_3 \xi_3(t)$, 可知, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\varepsilon_\rho, \varepsilon_\phi$ 和 ε_γ 趋近于原点的邻域, 从而 ρ_e, γ 和 ϕ 也趋近于原点附近的小区域内, AUV抗扰控制器稳定性证明完成。

4 仿真实验分析

4.1 水下机械臂静止状态仿真实验

为了验证本文设计的AUV三维路径跟踪控制器的有效性, 进行了仿真实验, 实验对象的相关动力学参数如表1所示。

表1 AUV动力学参数
Tab.1 AUV dynamic parameters

模型参数	数值	模型参数	数值
m/kg	50	$M_{\dot{q}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	-5.97
$X_u/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	-14.85	$N_{\dot{r}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	-6.05
$Y_v/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	-55.21	$X_{u u}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1})$	-7.04
$Z_w/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	-51.33	$Y_{v v}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1})$	-200.53
$X_{\dot{u}}/\text{kg}$	-2.77	$Z_{w \dot{w}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1})$	-155.82
$Y_{\dot{v}}/\text{kg}$	-54.01	$M_{q \dot{q}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{rad}^{-2})$	-4.28
$Z_{\dot{w}}/\text{kg}$	-54.03	$N_{r \dot{r}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{rad}^{-2})$	-5.39
$I_y/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	8.09	$M_{\dot{q}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{rad}^{-2})$	-26.1
$I_z/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	8.91	$N_{\dot{r}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{rad}^{-2})$	-29.9
z_b/m	-0.02	L/m	1.6

实际中, AUV常常采用三维螺旋曲线运动的方式进行爬升和下潜, 从而到达指定深度, 因此, 本文根据实测水动力系数建立AUV六自由度仿真模型, 针对AUV螺旋下潜作业, 规划期望的三维曲线路径为

$$\begin{cases} x_r(t) = 10\sin(0.1t), \\ y_r(t) = 10\cos(0.1t), \\ z_r(t) = -0.1t. \end{cases} \quad (41)$$

设置仿真时间为150 s, 在AUV的整个运动过程中, 水下机械臂保持静止, 其大臂关节的角度为 90° , 小臂关节的角度为 -90° 。水下机械臂对AUV本体的干扰根据3.1节的方程进行解算, 得到静止

条件下水下机械臂对AUV本体在垂直面上的干扰力和干扰力矩为常值,解算结果如图4所示。

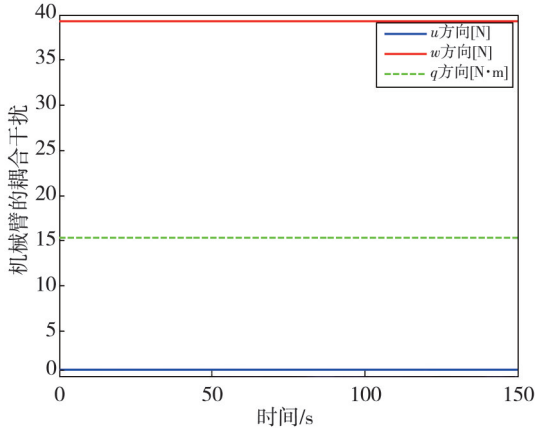


图4 水下机械臂对AUV本体的耦合干扰

Fig. 4 Coupling interference of underwater manipulator to AUV

控制目标是利用式(18)提出的AUV抗扰控制器,在机械臂耦合干扰、系统未建模动态和外界海流干扰的影响下,在设定的性能条件下跟踪到参考轨迹。AUV的初始条件是自适应参数的初始值为: $P(0)=[-10\text{ m } 15\text{ m } 0\text{ m}]$, $\phi_0=0\text{ rad}$, $\theta_0=0\text{ rad}$, $u_0=0\text{ m/s}$, $v_0=0\text{ m/s}$, $w_0=0\text{ m/s}$ 。自适应参数的初始值为 $\theta(0)=[1\ 4\ 1\ 1]^T$ 。控制器参数被设置为 $K_1=5 \times \text{diag}[1\ 1\ 1]$, $K_2=1 \times \text{diag}[1\ 1\ 1]$, $\Lambda=\text{diag}[5\ 5\ 5]$, $\Gamma_\theta=\text{diag}[1\ 4\ 1\ 1]$, $\delta_\theta=1$, $\varepsilon_2=30$, 神经网络参数设置为 $n_2=10$, $\delta_w=0.9$, $\delta_v=0.9$, $\Gamma_w=I_{n_2+1}$, $\Gamma_v=I_{n_1+1}$, $\hat{W} \in R^{11 \times 3}$, $\hat{V} \in R^{24 \times 10}$, 设定的性能函数的参数为 $\lambda_1=0.1$, $\lambda_2=0.2$, $\lambda_3=0.1$, $\xi_{10}=1$, $\xi_{20}=4$, $\xi_{30}=5$, $\xi_{1\infty}=0.004$, $\xi_{2\infty}=0.08$, $\xi_{3\infty}=0.08$, $a_1=0.5$, $b_1=35$, $a_2=b_2=0.6$, $a_3=b_3=0.7$, $p_1=p_2=p_3=1$ 。

由施加在AUV上的有界的外部干扰来模拟由海流引起的干扰作用,即,

$$\tau_{vj} = 0.25 \text{sign}(j), j = u, v, w, q, r。$$

AUV的未知非线性动态的影响可表示为

$$f_i(i) = a_{i1}i + a_{i2}|i| + a_{i3}i^3, i = u, v, w, q, r,$$

式中: $a_{i1}=0.5$; $a_{i2}=0.25$; $a_{i3}=0.15$ 。

图5和图6分别为AUV在 x, y 与 z 三个方向的轨迹跟踪曲线和在三维空间的轨迹跟踪效果。由图5可以看出,AUV系统存在未知的非线性动态,在外部存在海流干扰和机械臂耦合干扰的情况下, x 和 y 方向上的初始位置与参考轨迹存在误差,分别在45s和30s左右跟踪到 x 和 y 方向上的跟踪轨迹。由图6

可以看出,AUV在45s左右跟踪到三维空间的参考轨迹,跟踪过程平稳顺滑,稳定性较好。

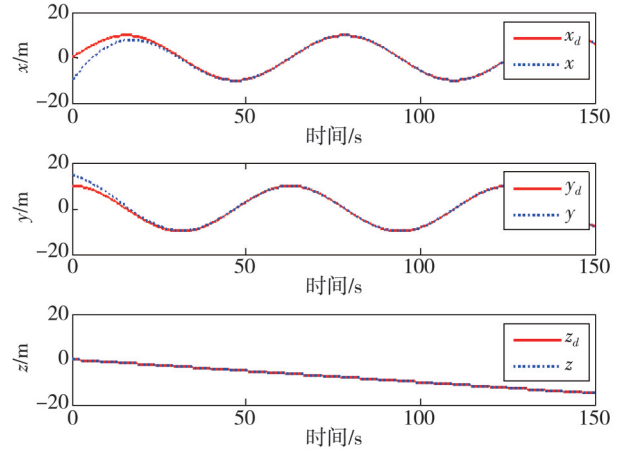


图5 AUV在 x, y 和 z 方向上的轨迹跟踪

Fig. 5 Trajectory tracking of AUV in x, y and z directions

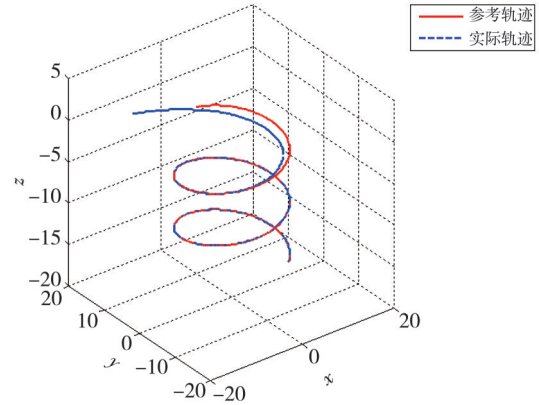


图6 AUV在三维空间的轨迹跟踪

Fig. 6 Trajectory tracking of AUV in 3D space

AUV抗扰控制器由误差控制项、神经网络控制项、自适应控制项和机械臂耦合干扰估计项组成。误差控制项用来减少AUV运动过程中的跟踪误差,机械臂耦合干扰估计项实时补偿机械臂对于AUV本体的干扰,神经网络控制项补偿AUV系统的结构性的不确定项,自适应控制项补偿神经网络估计误差、机械臂耦合干扰补偿误差和外部海流干扰引起的非结构性误差。综合以上的跟踪效果,AUV抗扰控制器整体上取得了预期的控制效果,可以有效抵抗水下机械臂的耦合干扰、海流干扰和AUV结构性的不确定性,具有很强的抗干扰能力和鲁棒性。

4.2 定点作业状态仿真实验

水下定点作业过程中,AUV主要作为运载器搭载水下机械臂在规定时间内运动到定点作业

处,因为受到机械臂耦合干扰、海流干扰等其他不确定性因素的影响,所以对AUV抗扰能力和规定时间内完成规划好的期望轨迹的跟踪能力要求较高。水下机械臂在抵达目标的过程中,考虑到能量消耗和控制效率,在运动初期阶段,根据任务规划层要求,水下机械臂各关节保持静止状态;在接近水下目标定点阶段,水下机械臂按照任务规划层规划好的轨迹进行展开,此时与距离目标定点位置还有一段既定缓冲距离,然后水下机械臂末端执行器到达既定位置并保持不变,最后由AUV按照任务规划层给出的期望轨迹携带机械臂运动到定点位置完成任务。

设定仿真实验环境中的水下机械臂和AUV的期望轨迹,以模仿水下定点任务中的AUV和AUV水下机械臂的运动过程,AUV三维空间期望轨迹如式(41)所示,由任务规划层给出,在150s时,AUV携带机械臂到达目标位置,完成水下定点作业。水下机械臂任务空间的期望轨迹如式(42)和式(43)所示,式(42)为水下机械臂末端相对于基坐标系的横向位置,式(43)为水下机械臂末端相对于基坐标系的纵向位置。在 $0 \leq t < 130$ s时,AUV携带机械臂到达定点位置处附近,此时水下机械臂的位形保持不变;在 $130 \leq t < 135$ s时,水下机械臂按照任务规划层给出的轨迹,使水下机械臂的末端位置在期望时间内到达预定位置;在 $135 \leq t < 150$ s时,水下机械臂的末端的位置保持不变,AUV按照任务规划层给出的期望轨迹携带着水下机械臂继续运动到目标位置,由水下机械臂完成水下的定点作业任务。

$$x_{Ed} = \begin{cases} 0.5 & 0 \leq t < 130, \\ \cos(t - 130) & 130 \leq t < 135, \\ \cos(5) & 135 \leq t < 150. \end{cases} \quad (42)$$

$$y_{Ed} = \begin{cases} 0.5 & 0 \leq t < 130, \\ 0.8 - 0.8\cos(2t) & 130 \leq t < 135, \\ 0.8 - 0.8\cos(10) & 135 \leq t < 150. \end{cases} \quad (43)$$

图7为水下机械臂对AUV本体的耦合干扰,在初始时刻,控制过程中产生的耦合干扰较大,在初始位置误差消除之后,水下机械臂保持静止,此阶段各个方向上的耦合干扰没有变化,在130s时,水下机械臂开始运动,水下机械臂在垂直面上对AUV的耦合干扰开始发生变化,在135~150s时,水下机械臂末端的位置到达期望位置且一直保持静止,因此,水下机械臂对于AUV

本体的耦合干扰为常值。

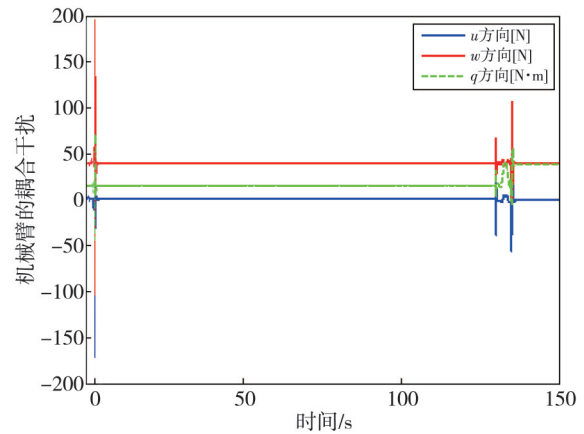


图7 垂直面上水下机械臂对AUV本体的耦合干扰

Fig. 7 Coupling interference of AUV by underwater manipulator in vertical plane

图8和图9为AUV的三维空间跟踪轨迹。

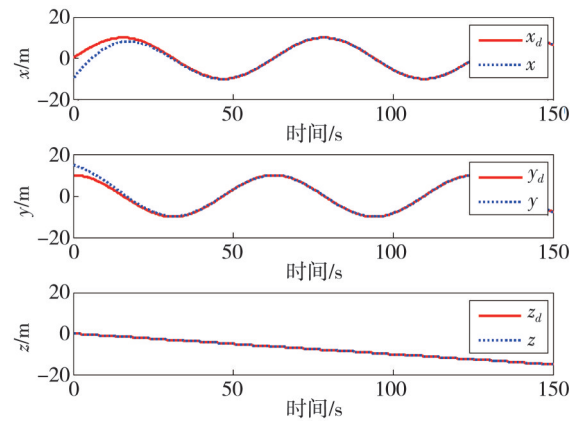


图8 AUV在x、y和z方向上的轨迹跟踪

Fig. 8 Trajectory tracking of AUV in x, y and z directions

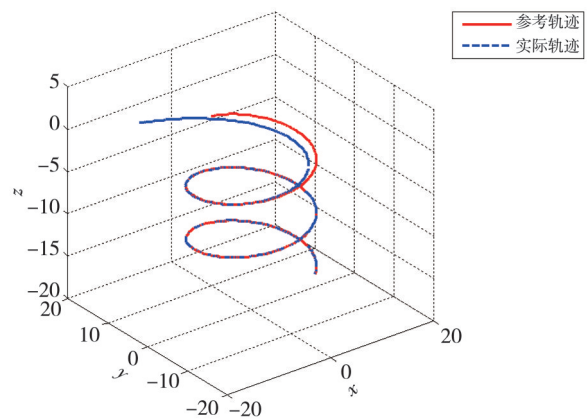


图9 AUV在三维空间的轨迹跟踪

Fig. 9 Trajectory tracking of AUV in 3D space

考虑到实际环境中存在水动力的作用信息传递的延迟和AUV的欠驱动特性等因素,水下机械臂对AUV本体的耦合影响并不能实现实时的完全补偿,因此,为了体现该控制器的抗扰性和鲁

棒性, 设定存在 10% 的补偿误差来验证 AUV 抗扰控制器的跟踪性能。

由图 8 和图 9 可以看出, AUV 系统存在未知非线性动态, 在海流干扰和机械臂耦合干扰情况下, x 和 y 方向上的初始位置与参考轨迹存在误差, 分别在 45 s 和 30 s 左右跟踪到 x 和 y 方向上的跟踪轨迹, AUV 在 45 s 左右跟踪到三维空间的参考轨迹, 跟踪过程平稳顺滑, 稳定性较好。

图 10 和图 11 分别为 AUV 在三维空间上的距离跟踪和姿态跟踪误差曲线, 从图中可以看出, 距离和姿态的跟踪误差以较高精度跟踪到期望轨迹, 具有较小的超调, 平稳性性较好, 与此同时, AUV 的距离和姿态跟踪误差按照设定的性能函数收敛到平衡状态, 达到了预期的控制效果。

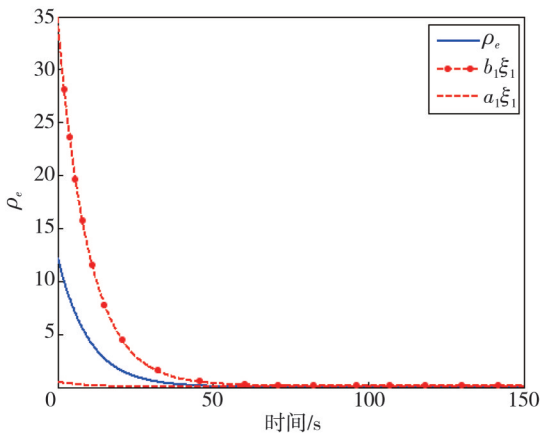


图 10 AUV 在三维空间的距离跟踪误差

Fig. 10 Range tracking error of AUV in 3D space

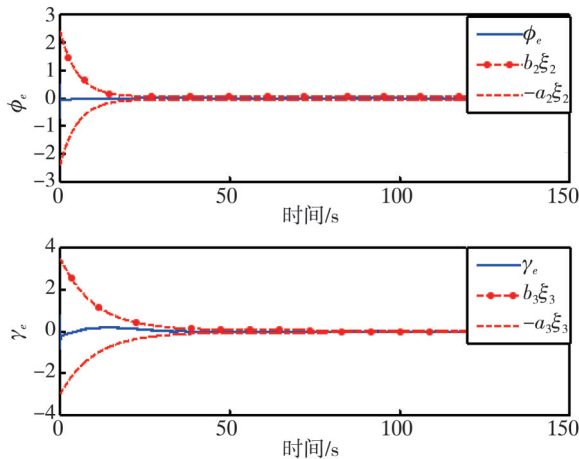


图 11 AUV 在三维空间的姿态跟踪误差

Fig. 11 Attitude tracking error of AUV in 3D space

在整个水下定点作业过程中, AUV 的三维空间轨迹仍按设定性能以较高精度趋近于期望轨迹, 则 AUV 抗扰控制器可以较好地抑制水下机械臂的耦合干扰、AUV 的结构性不确定性与非结构

性不确定性的影响, 具有较强的鲁棒性。

图 12~图 14 为水下机械臂在任务空间水下定点作业过程中的轨迹跟踪情况, 因为与 AUV 的运动学耦合, 水下机械臂末端执行器的跟踪误差有所增大, 但跟踪精度仍可以达到 2.5 cm 左右, 可以满足很多类型的水下定点作业的需求, 例如海底热液和冷泉处的生物取样等。

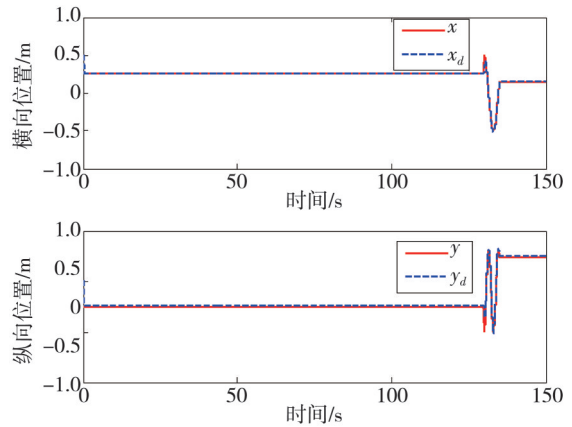


图 12 水下机械臂末端执行器的位置跟踪

Fig. 12 Position tracking of underwater manipulator end effector

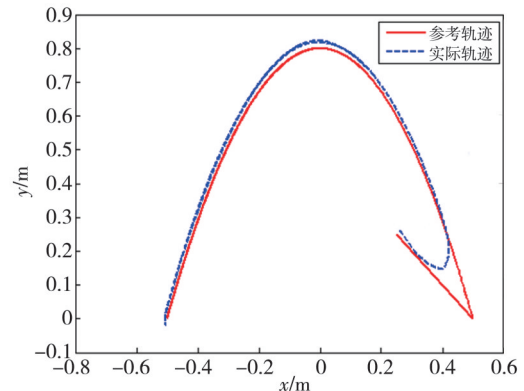


图 13 水下机械臂的任务空间轨迹

Fig. 13 Mission space trajectory of underwater manipulator

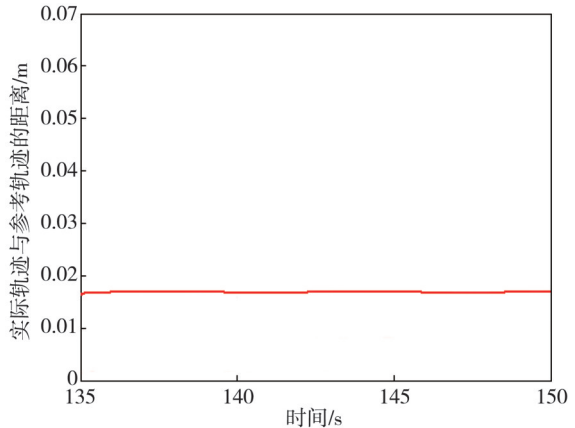


图 14 水下机械臂末端执行器的跟踪误差

Fig. 14 Tracking error of underwater manipulator end effector

5 结论

本文根据UVMS在水下定点作业过程中的任务需求,提出了一种误差受限抗扰控制方法,基于视线法和设定函数建立了三维空间的AUV误差动力学方程,并基于此方程设计了AUV抗扰控制器。该控制器采用牛顿-欧拉法实现水下机械臂对于AUV本体的耦合干扰的实时估计与补偿,通过神经网络控制方法减少AUV结构性不确定对其运动带来的影响,通过自适应控制方法抵消AUV非结构性不确定性和水下机械臂的补偿误差的影响,具有较好的抗扰能力和鲁棒性能。同时,通过水下机械臂静止状态下的仿真实验验证了该控制器可以有效实现欠驱动AUV在设定性能下的三维空间中的轨迹跟踪,并且对水下机械臂耦合干扰、结构性不确定和海流干扰等其他非结构性的不确定性具有较强的抑制能力;通过有机整合AUV和 underwater 机械臂的控制算法,进行定点作业状态下的UVMS系统仿真实验,验证了水下定点过程中的AUV可以在仿真实验设定的时间内完成携带水下机械臂从当前位置到目标位置的运动控制任务,水下机械臂的末端可以快速跟踪上期望轨迹并在仿真设定的时间到达期望位置,且末端的作业精度可以满足定点作业任务的需求,同时也验证了分离式UVMS运动控制方案在水下定点作业任务中的可行性和有效性。

参考文献:

- [1] DI VITO D, DE PALMA D, SIMETTI E, et al. Experimental validation of the modeling and control of a multibody underwater vehicle manipulator system for sea mining exploration[J/OL]. *Journal of Field Robotics*, 2021, 38(2): 171-191.
- [2] KARIMI H R, LU Y Y. Guidance and control methodologies for marine vehicles: A survey [J]. *Control Engineering Practice*, 2021, 111: 104785.
- [3] WOOLFREY J, LIU D, CARMICHAEL M. Kinematic control of an autonomous underwater vehicle-manipulator system (AUVMS) using autoregressive prediction of vehicle motion and model predictive control [C]//2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Stockholm, Sweden. IEEE, 2016: 4591-4596.
- [4] DAI Y, YU S, YAN Y. An adaptive EKF-FMPC for the trajectory tracking of UVMS[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2020, 45(3): 699-713.
- [5] OLIVEIRA É L, ORSINO R M M, DONHA D C. Disturbance-Observer-based model predictive control of underwater vehicle manipulator systems [J/OL]. *IFAC-Papers Online*, 2021, 54(16): 348-355.
- [6] XIONG X, XIANG X, WANG Z, et al. On dynamic coupling effects of underwater vehicle-dual-manipulator system[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 258: 111699.
- [7] 侯冬冬, 都军民, 秦丽萍, 等. 基于自适应干扰观测器的水下机器人—机械臂系统反步控制[J]. *水下无人系统学报*, 2023, 31(3): 413-420.
HOU Dongdong, DU Junmin, QIN Liping, et al. Backstepping control of auv-manipulator system based on adaptive disturbance observer[J]. *Journal of Underwater Unmanned Systems*, 2023, 31(3): 413-420. (in Chinese)
- [8] MOHAN S, KIM J. Coordinated motion control in task space of an autonomous underwater vehicle-manipulator system [J]. *Ocean Engineering*, 2015, 104: 155-167.
- [9] HAN H, WEI Y H, YE X F, et al. Motion planning and coordinated control of underwater vehicle-manipulator systems with inertial delay control and fuzzy compensator [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(11): 3944.
- [10] TANG C, WANG Y, WANG S, et al. Robust iterative multi-task control of the underwater biomimetic vehicle-manipulator system [C]//2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Qingdao, China. IEEE, 2016: 823-828.
- [11] CONTI R, FANELLI F, MELI E, et al. A free floating manipulation strategy for autonomous underwater vehicles[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2017, 87: 133-146.
- [12] 经慧祥, 侯冬冬, 王凯, 等. 水下作业机器人滑模自抗扰控制方法研究[J]. *舰船科学技术*, 2023, 45(1): 101-107.
JING Huixiang, HOU Dongdong, WANG Kai, et al. Research on sliding mode active disturbance rejection control method of underwater robot [J]. *Ship Science and Technology*, 2023, 45(1): 101-107. (in Chinese)
- [13] DUNNIGAN M W, RUSSELL G T. Evaluation and reduction of the dynamic coupling between a manipulator and an underwater vehicle [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1998, 23(3): 260-273.
- [14] MCLAIN T W, ROCK S M, LEE M J. Experiments in the coordinated control of an underwater arm/vehicle system[J]. *Autonomous Robots*, 1996, 3(2/

- 3): 213-232.
- [15] FJELLSTAD O E, FOSSEN T I. Position and attitude tracking of AUV's: a quaternion feedback approach [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1994, 19(4): 512-518.
- [16] ANTONELLI G, CHIAVERINI S. Singularity-free regulation of underwater vehicle-manipulator systems [C]//Proceedings of the 1998 American Control Conference (ACC), Philadelphia, PA, USA. IEEE, 1998: 399-403.
- [17] 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.
- [18] ARRICHIELLO V, BARTOLINI G, PISANO A, et al. Attitude and position tracking of autonomous 6 d. o. f. vehicles with mono-directional actuators [C]// 2016 14th International Workshop on Variable Structure Systems (VSS). Nanjing, China: IEEE, 2016: 80-85.
- [19] DU X, XIAO H, HOU D, et al. A quaternion-based sliding mode controller for UVMS [C]//2020 Chinese Automation Congress (CAC). Shanghai, China. IEEE, 2020: 3552-3557.
- [20] 蒋新松, 封锡盛, 王棣棠. 水下机器人 [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2000.
- [21] 黄琰, 李岩, 俞建成, 等. AUV智能化现状与发展趋势 [J]. 机器人, 2020, 42(2): 215-231.
- HUANG Yan, LI Yan, YU Jiancheng, et al. State-of-the-art and development trends of AUV intelligence [J]. Robot, 2020, 42(2): 215-231. (in Chinese)
- [22] FOSSEN T I. Guidance and control of ocean vehicles [M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 1994.
- [23] KHALIL A K. Nonlinear systems [M]. 3rd. New Jersey: Prentice Hall, 2001.