

文章编号: 1001-0920(2011)10-1452-07

基于离散滑模预测的欠驱动 AUV 三维航迹跟踪控制

贾鹤鸣¹, 程相勤², 张利军¹, 边信黔¹, 严浙平¹

(1. 哈尔滨工程大学 自动化学院, 哈尔滨 150001; 2. 海军核辐射仪器计量站, 山东 青岛 266100)

摘要: 针对欠驱动自主水下航行器(AUV)的模型不确定和外界海流干扰问题, 为了实现欠驱动 AUV 的三维航迹跟踪控制, 采用虚拟向导法建立空间运动误差离散化模型. 基于递归滑模思想设计离散滑模预测控制器, 利用滚动优化和反馈校正方法补偿了不确定项对滑模预测模型的影响. 最后针对某欠驱动 AUV 进行了空间曲线跟踪控制仿真实验. 结果表明, 所设计的控制器可以较好地克服时变非线性水动力阻尼对系统的影响, 并对外界海流干扰有较好的抑制作用, 保证了欠驱动 AUV 三维航迹跟踪系统的鲁棒性, 实现了三维航迹的精确跟踪.

关键词: 欠驱动自主水下航行器; 三维航迹跟踪; 离散滑模预测; 虚拟向导

中图分类号: TP24

文献标识码: A

Three-dimensional path tracking control for an underactuated AUV based on discrete-time sliding mode prediction

JIA He-ming¹, CHENG Xiang-qin², ZHANG Li-jun¹, BIAN Xin-qian¹, YAN Zhe-ping¹

(1. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. Navy Nuclear Radiation Instrument Measurement Station, Qingdao 266100, China. Correspondent: JIA He-ming, E-mail: jiaheminglyucky99@126.com)

Abstract: According to the model uncertainties problem of an underactuated autonomous underwater vehicle(AUV) and the environmental current disturbances problem, in order to achieve the three-dimensional path tracking control of the underactuated AUV, the space movement error model is established based on virtual guidance method. The discrete-time sliding mode predictive controller is designed based on recursive sliding mode designing theory. Feedback correction and receding horizon optimization approaches are employed to compensate the influence of uncertainties for the sliding mode predictive model. Finally, space curve tracking simulation experiment is carried out by an underactuated AUV. The simulation results show that the designed controller can overcome the influence of time-varying nonlinear hydrodynamic damping to the control system, even the proposed control scheme has better effect on attenuating the external current disturbances. Thus the robustness of three-dimensional path following system is guaranteed and the tracking control with high tracking precision can be achieved.

Key words: underactuated autonomous underwater vehicle; three-dimensional path tracking; discrete-time sliding mode prediction; virtual guidance method

1 引言

自主水下航行器(AUV)三维航迹精确跟踪能力是实现水下勘探、打捞和施工作业以及自身避障的重要技术前提^[1]. 由于本文研究的 AUV 具有欠驱动特性和加速度不可积的非完整约束条件^[2], 加上外界海流的干扰^[3], 从而令其实现三维航迹跟踪控制更加困难.

目前的 AUV 三维航迹跟踪是分别对解耦后的水平面和垂直面运动单独设计控制器来间接实现的^[4-6],

现有的研究以水平面跟踪控制和动力定位为主. 文献[7-8]基于 Lyapunov 稳定性理论和反步法设计水平面航迹跟踪控制器, 而基于精确模型和反步法思想设计的控制器, 由于结构复杂不利于工程实现, 难以保证实际工况下系统的控制品质. 针对海流干扰影响, [9]提出了基于模型预测-校正控制策略的神经网络逆控制方法, 提高了 AUV 水平面航迹跟踪的抗海流干扰能力和跟踪精度. [10-11]分别利用基于模糊神经网络的直接自适应控制方法和神经网络自适应控

收稿日期: 2010-05-25; 修回日期: 2010-08-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60704004); 教育部博士点基金项目(20070217078, 20102304110003).

作者简介: 贾鹤鸣(1983-), 男, 博士生, 从事非线性系统控制的研究; 张利军(1973-), 男, 教授, 博士生导师, 从事非线性系统控制技术的研究.

制方法对上述问题进行了水池实验研究, 结果表明所设计的控制器可以实现较好地跟踪控制. 以上控制算法忽略了垂直面对水平面的耦合影响, 即未充分考虑 AUV 系统中非线性阻尼的时变性和不确定性给控制器设计带来的影响, 基于上述控制器无法实现 AUV 三维航迹的精确跟踪控制.

本文针对欠驱动 AUV 三维航迹精确跟踪控制问题, 提出了基于预测控制思想设计的离散滑模预测控制方法. 基于虚拟向导的方法建立 AUV 空间运动误差模型, 并依据递归滑模思想建立离散滑模预测模型, 利用滚动优化和反馈校正方法补偿了不确定项对于滑模预测模型的影响. 基于 AUV 虚拟仿真平台, 通过航迹制导器对一序列航迹点进行拟合产生指令航线, 并利用本文的控制方法进行了欠驱动 AUV 空间曲线跟踪控制仿真实验. 结果表明, 所设计的控制器可以较好地克服时变非线性水动力阻尼对系统的影响, 并对于非定常海流干扰有较好的抑制作用, 可以实现三维航迹的精确跟踪.

2 欠驱动 AUV 空间航迹跟踪误差方程

本节依据虚拟向导的方法, 建立欠驱动 AUV 空间曲线航迹跟踪的运动学误差方程, 并实现其离散化. 本节的推导采用下列基本假设: 1) 期望路径是确定的参数化曲线; 2) 虚拟向导的设计参数为正且有上确界; 3) AUV 速度为非负的, 即 AUV 不能倒车航行; 4) AUV 忽略横滚运动的影响.

2.1 基于虚拟向导的 AUV 运动学误差方程

图 1 为 AUV 空间航迹跟踪示意图.

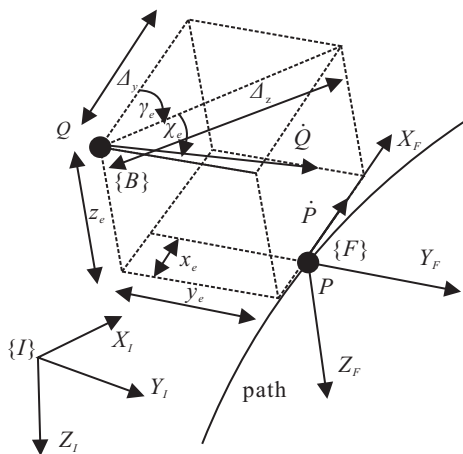


图 1 基于虚拟向导的 AUV 三维航迹跟踪示意图

图 1 中: $\{I\}$, $\{F\}$ 和 $\{B\}$ 分别为固定坐标系、弗雷涅-塞雷坐标系和 AUV 随体坐标系; U_B 为 AUV 的速度向量, 满足 $U_B = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$; γ_e 和 χ_e 分别为 $\{B\}$ 坐标系统 Z 轴和 Y 轴到 $\{F\}$ 坐标系的旋转角度; path 为多波束声纳探测生成的期望空间航迹曲线, 是以 μ 为参数变量的连续光滑曲线; p 点为 AUV 航迹

规划曲线上具有一定速度 U_P 的任意一点, 为虚拟向导 AUV 的质点, 其在 $\{I\}$ 坐标系下的位置向量和速度向量分别为

$$P = [x_P, y_P, z_P]^T, \dot{P} = [\dot{x}_P, \dot{y}_P, \dot{z}_P]^T,$$

p 点的速度为

$$U_P = \|\dot{P}\| = \sqrt{\dot{P}^T \dot{P}}, \quad (1)$$

其航迹角 γ_P 和潜浮角 χ_P 分别为

$$\gamma_P = \arctan(\dot{y}_P(\mu)/\dot{x}_P(\mu)),$$

$$\chi_P = \arctan(\dot{z}_P(\mu)/\sqrt{\dot{x}_P(\mu)^2 + \dot{y}_P(\mu)^2}),$$

$$\dot{x}_P(\mu) = \frac{dx_P}{d\mu}(\mu); \quad (2)$$

坐标系 $\{F\}$ 的 X_F 轴与速度向量 \dot{P} 方向一致, 因此坐标系 $\{I\}$ 与坐标系 $\{F\}$ 间的转换矩阵为

$$R_P = \begin{bmatrix} \cos \gamma_P \cos \chi_P & -\sin \gamma_P \cos \gamma_P \sin \chi_P \\ \sin \gamma_P \cos \chi_P & \cos \gamma_P \sin \gamma_P \sin \chi_P \\ -\sin \chi_P & 0 & \cos \chi_P \end{bmatrix}; \quad (3)$$

设 Q 点为真实 AUV 的质点, 在 $\{I\}$ 坐标系下的位置向量和速度向量分别为

$$Q = [\xi, \eta, \zeta]^T, \dot{Q} = [\dot{\xi}, \dot{\eta}, \dot{\zeta}]^T,$$

Q 点的速度为

$$U = \|\dot{Q}\| = \sqrt{\dot{Q}^T \dot{Q}},$$

其航迹角 γ_Q 和潜浮角 χ_Q 分别为

$$\gamma_Q = \arctan(\dot{\eta}/\dot{\xi}), \chi_Q = \arctan(\dot{\zeta}/\sqrt{\dot{\xi}^2 + \dot{\eta}^2}). \quad (4)$$

AUV 在水下空间的运动过程中, 存在一定的冲角 α 和漂角 β ^[12], 因此 AUV 的艏向角 ϕ 和纵倾角 θ 分别为

$$\phi = \gamma_Q - \beta, \theta = \chi_Q - \alpha, \quad (5)$$

则 AUV 的运动学方程可以表示为速度向量 U_B 下的形式, 即

$$\dot{\xi} = U_B \cos \gamma_Q \cos \chi_Q, \dot{\eta} = U_B \sin \gamma_Q \cos \chi_Q,$$

$$\dot{\zeta} = U_B \sin \chi_Q, \dot{\chi}_Q = q + \dot{\alpha}, \dot{\gamma}_Q = r / \cos \theta + \dot{\beta}. \quad (6)$$

为了推得 $\{F\}$ 坐标系下的 AUV 运动学误差方程, 设 Q 点和 P 点在坐标系 $\{F\}$ 下的误差向量为

$$\varepsilon = R_P^T(Q - P), \quad (7)$$

其中 $\varepsilon = [x_e, y_e, z_e]^T \in \mathbb{R}^3$. 将式 (7) 对时间求导得

$$\dot{\varepsilon} = \dot{R}_P^T(Q - P) + R_P^T(\dot{Q} - \dot{P}). \quad (8)$$

其中

$$\dot{R}_P = R_P S_P,$$

$$S_P = \begin{bmatrix} 0 & -\dot{\gamma}_P \cos \chi_P & \dot{\chi}_P \\ \dot{\gamma}_P \cos \chi_P & 0 & \dot{\gamma}_P \sin \chi_P \\ -\dot{\chi}_P & -\dot{\gamma}_P \sin \chi_P & 0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

S_P 为反对称矩阵, 满足 $S_P = -S_P^T$. 针对 Q 点速度向量存在

$$\dot{Q} = R_P R_e V_B. \quad (10)$$

其中

$$V_B = [U_B, 0, 0]^T, \\ R_e = \begin{bmatrix} \cos \gamma_e \cos \chi_e & -\sin \gamma_e \cos \gamma_e \sin \chi_e \\ \sin \gamma_e \cos \chi_e & \cos \gamma_e \sin \gamma_e \sin \chi_e \\ -\sin \chi_e & 0 & \cos \chi_e \end{bmatrix}. \quad (11)$$

同样, 针对 P 点速度向量 \dot{P} , 存在

$$V_B = [U_B, 0, 0]^T, \dot{P} = R_P U_P. \quad (12)$$

将式(10)和(12)代入(8)可得 AUV 在坐标系 $\{F\}$ 下的位置误差方程为

$$\dot{\varepsilon} = \\ (R_P S_P)^T (Q - P) + R_P^T (R_P R_e U_B - R_P U_P) = \\ S_P^T \varepsilon + R_e U_B - U_P. \quad (13)$$

令 $U_B = U_d$, U_d 为 AUV 期望航行速度, 展开得到 AUV 位置误差方程为

$$\dot{x}_e = y_e \dot{\gamma}_P \cos \chi_P - z_e \dot{\chi}_P + U_d \cos \gamma_e \cos \chi_e - U_P, \\ \dot{y}_e = -x_e \dot{\gamma}_P \cos \chi_P - z_e \dot{\gamma}_P \sin \chi_P + \\ U_d \sin \gamma_e \cos \chi_e, \\ \dot{z}_e = x_e \dot{\chi}_P + y_e \dot{\gamma}_P \sin \chi_P - U_d \sin \chi_e. \quad (14)$$

其中

$$\dot{\gamma}_P = \frac{y_P' x_P'' - y_P'' x_P'}{(x_P')^2 + (y_P')^2} \dot{\mu}, \\ \dot{\chi}_P = \frac{z_P''((x_P')^2 + (y_P')^2) - z_P'(x_P'' x_P' - y_P'' y_P')}{((x_P')^2 + (y_P')^2 + (z_P')^2) \sqrt{(x_P')^2 + (y_P')^2}} \dot{\mu}, \\ x_P' = \frac{dx_P(\mu)}{d\mu}, x_P'' = \frac{d^2 x_P(\mu)}{d\mu^2}, \\ \cos \chi_P = \frac{\sqrt{(x_P')^2 + (y_P')^2}}{\sqrt{(x_P')^2 + (y_P')^2 + (z_P')^2}}, \\ \sin \chi_P = \frac{z_P'}{\sqrt{(x_P')^2 + (y_P')^2 + (z_P')^2}}.$$

设 ϕ_e 和 θ_e 为艏向角误差和纵倾角误差, 则存在 $\phi_e = \gamma_e - \beta_e$, $\theta_e = \chi_e - \alpha_e$. 由式(5)和(6)可得

$$\dot{\phi}_e = r / \cos \theta + \dot{\beta}_e - \dot{\gamma}_P, \\ \dot{\theta}_e = q + \dot{\alpha}_e - \dot{\chi}_P. \quad (15)$$

令 $c_1(\mu)\dot{\mu} = \dot{\gamma}_P$, $c_2(\mu)\dot{\mu} = \dot{\chi}_P$, $c_3(\mu) = \cos \chi_P$, $c_4(\mu) = \sin \chi_P$, 综合考虑式(14)和(15)可得 AUV 运动学误差模型^[4]为

$$\dot{x}_e = y_e c_1(\mu) c_3(\mu) \dot{\mu} - z_e c_2(\mu) \dot{\mu} + \\ U_d \cos \phi_e \cos \theta_e - U_P, \\ \dot{y}_e = -x_e c_1(\mu) c_3(\mu) \dot{\mu} - z_e c_1(\mu) c_4(\mu) \dot{\mu} +$$

$$U_d \sin \phi_e \cos \theta_e,$$

$$\dot{z}_e = x_e c_2(\mu) \dot{\mu} + y_e c_1(\mu) c_4(\mu) \dot{\mu} - U_d \sin \theta_e,$$

$$\dot{\theta}_e = q + \dot{\alpha}_e - c_2(\mu) \dot{\mu},$$

$$\dot{\phi}_e = r / \cos \theta + \dot{\beta}_e - c_1(\mu) \dot{\mu}. \quad (16)$$

为了保证 AUV 动态特性与期望航迹曲线特性的完整结合, 针对误差系统(16), 基于 Lyapunov 稳定性理论, 设计虚拟目标的速度为

$$U_P = U_d \cos \phi_e \cos \theta_e + \kappa x_e, \quad (17)$$

其中 $\kappa > 0$ 为增益参数. 依据运动学关系(12)求得

$$\dot{\mu} = \frac{U_d \cos \phi_e \cos \theta_e + \kappa x_e}{\sqrt{\dot{x}_P^2 + \dot{y}_P^2 + \dot{z}_P^2}}. \quad (18)$$

且存在^[13]

$$\phi_e = \arctan(-y_e / \Delta_y), \theta_e = \arctan(z_e / \Delta_z).$$

代入式(17)可得

$$U_P = U_d \frac{\Delta_y}{\sqrt{y_e^2 + \Delta_y^2}} \frac{\Delta_z}{\sqrt{z_e^2 + \Delta_z^2}} + \kappa x_e, \quad (19)$$

其中 Δ_y 和 Δ_z 为满足假设条件 2) 的时变参数.

2.2 系统方程离散化

动态系统的控制趋向数字控制方式, 使得控制程序具有更精确的决策性和更灵活的实现性. 然而, 由于采样时间的影响, 在数字控制器上执行针对连续时间系统设计的控制算法时, 不能达到满意的控制性能, 甚至可能出现离散化后不稳定的问题. 在设计控制系统时, 需要建立系统的离散模型, 采用差分方程进行描述. 针对欠驱动 AUV 误差动态系统(16), 定义

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{\varepsilon(k+1) - \varepsilon(k)}{T}, \quad (20)$$

得到欠驱动 AUV 离散化的运动学误差方程为

$$x_e(k+1) = \\ c_1(\mu(k))c_3(\mu(k))(\mu(k+1) - \mu(k))y_e(k) - \\ c_2(\mu(k))(\mu(k+1) - \mu(k))z_e(k) + x_e(k) + \\ TU_d \cos \phi_e(k) \cos \theta_e(k) - TU_P(k), \\ y_e(k+1) = \\ -c_1(\mu(k))c_3(\mu(k))(\mu(k+1) - \mu(k))x_e(k) - \\ c_1(\mu(k))c_4(\mu(k))(\mu(k+1) - \mu(k))z_e(k)y_e(k) + \\ TU_d \sin \phi_e(k) \cos \theta_e(k), \\ z_e(k+1) = \\ c_2(\mu(k))(\mu(k+1) - \mu(k))x_e(k) + z_e(k) + \\ c_1(\mu(k))c_4(\mu(k))(\mu(k+1) - \mu(k))y_e(k) + \\ TU_d \sin \theta_e(k), \\ \theta_e(k+1) = Tq(k) + \alpha_e(k+1) - \alpha_e(k) - \\ c_2(\mu(k))(\mu(k+1) - \mu(k)),$$

$$\begin{aligned} \phi_e(k+1) &= Tr(k)/\cos\theta(k) + \beta_e(k+1) - \\ &\beta_e(k) - c_1(\mu(k))(\mu(k+1) - \mu(k)). \end{aligned} \quad (21)$$

为了进一步设计离散滑模预测控制器(DSMPC), 需得到 AUV 离散化的动力学模型. 依据文献[14]中的 UAUV 动力学模型, 离散化可得

$$\begin{aligned} u(k+1) &= T(m_{vr}v(k)r(k) + m_{wq}w(k)q(k) + \\ &d_u(k) + X_{prop}(k) + \omega_1(k))/m_{11} + u(k), \\ v(k+1) &= (d_v(k) + \omega_2(k))/m_{22} + v(k) + \\ &Tm_{ur}u(k)r(k), \\ w(k+1) &= (d_w(k) + \omega_3(k))/m_{33} + w(k) + \\ &Tm_{uq}u(k)q(k), \\ q(k+1) &= T(d_q(k) + M_{prop}(k) + \omega_4(k))/m_{44} + q(k), \\ r(k+1) &= T(d_r(k) + N_{prop}(k) + \omega_5(k))/m_{55} + r(k). \end{aligned} \quad (22)$$

设

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k) &= \\ [x_e(k), x_e(k+1), y_e(k), y_e(k+1), z_e(k), \\ z_e(k+1), \theta_e(k), \theta_e(k+1), \phi_e(k), \phi_e(k+1)]^T &= \\ [x_1(k), x_2(k), \dots, x_9(k), x_{10}(k)]^T. \end{aligned} \quad (23)$$

结合式(21)和(22), 可得离散化的动态误差方程为

$$\begin{cases} x_{2i-1}(k+1) = x_{2i}(k), \quad i = 1, 2, \dots, 5; \\ x_{2i}(k+1) = f_i(\mathbf{x}(k)) + g_i(\mathbf{x}(k))\tau_i(k) + \varpi_i(k). \end{cases} \quad (24)$$

其中 $\varpi_i(k)$ 表示系统不确定项和海流干扰. 此时有

$$\begin{aligned} \tau(k) &= [\tau_1(k), \tau_2(k), \dots, \tau_5(k)] = \\ [X_{prop}(k), X_{prop}(k), X_{prop}(k), M_{prop}(k), N_{prop}(k)]. \end{aligned}$$

系统(24)形式上为全驱动的控制输入, 实际只是前向推力作用于横向和垂向运动的耦合力. 在 AUV 的实际航行过程中, 螺旋桨的推力 $X_{prop}(k)$ 主要实现纵向航速稳定, 航速稳定后 $X_{prop}(k)$ 也基本处于稳定状态, 无法作为横向误差和垂向误差的控制输入进行调整控制. 因此, 系统(24)仍然为欠驱动系统, 横向位置误差和垂向位置误差的镇定依然是由 AUV 姿态角的控制来实现的.

3 离散滑模预测控制器设计

针对 AUV 模型的非线性和外界的不确定干扰问题, 滑模控制是实现其稳定跟踪的一种有效方法. 本文选取的离散滑模预测控制方法对于传统滑模控制方法而言, 有如下几个优点: 1) 保证系统性能良好的情况下可获得最优的控制率, 节省执行机构耗能; 2) 系统外界不确定干扰的有界性无需考虑, 更加符合实际作业环境的特点, 大大增强控制系统的鲁棒性;

3) 离散控制算法更容易在计算机或单片机等控制芯片设备上实现, 有利于工程实际应用.

3.1 离散滑模预测模型

控制目标是设计一个非切换型的滑模控制率, 以保证系统(24)中的各个状态以稳定的方式趋近于 0. 基于滑模控制器(SMC)设计理论, 分两步实现上述目标: 1) 构造满足期望性能的滑模面; 2) 设计合适的控制率令系统状态能够到达该滑模面并一直保持在其上. 滑模控制的核心思想在于通过设计滑动模态, 使状态空间的维数降至控制输入的维数. 对于欠驱动 AUV 而言, 由于控制输入向量 τ 的维数小于系统自由度, 需要在不同输出通道之间设计滑动模态(即降维设计), 特别是无驱动自由度与驱动自由度之间.

首先选取离散滑模切换函数为

$$s_i(k) = x_{2i}(k) + \sigma_i x_{2i-1}(k), \quad i = 1, 2, \dots, 5. \quad (25)$$

相应的滑模面为

$$S = \{x(k) | s_i(x(k)) = 0\}.$$

在式(25)中, 为了保证系统理想准滑动模态的稳定性和良好的动态性能, σ_i 的选择必须使得 $z + \sigma_i = 0$ 的根在单位圆的右半单位圆内^[15], 即 $-1 < \sigma_i < 0$.

将模型预测控制(MPC)引入离散滑模控制(DSMC)系统, 可得到 DSMPC 算法. 若采用多步预测方法, 则需根据多个滑模预测值来计算当前的控制量, 并要正确选择预测时域长度、控制时域长度以及最优指标中的加权系数矩阵, 这使得控制的计算较为繁琐, 不利于工程的实现. 预测控制理论的研究表明, 对于被控过程的每一输出, 只选择未来某一时刻的预测值计算最优控制律, 其相应的控制步数仅取一步, 可获得与多步 MPC 相同的调节性能. 基于这一思想, 可得到一种简单实用的单值滑模预测控制算法^[16]. 由于递归滑模的方法能够保证离散滑模面的鲁棒性和不变性, 利用递归滑模思想构造如下滑模预测模型^[17]:

$$\begin{aligned} s_{mi}(k+1) &= f_i(\mathbf{x}(k)) + g_i(\mathbf{x}(k))\tau_i(k) + \sigma_i x_{2i}(k) + \\ &\gamma_i s_i(k), \quad i = 1, 2, \dots, 5, \end{aligned} \quad (26)$$

其中 γ_i 为满足 $0 < \gamma_i \leq 1$ 的设计参数.

3.2 滑模预测控制器设计

AUV 在实际航行中, 由于水动力系数的时变性和非线性、海流干扰等因素的影响, 滑模预测模型难免存在偏差. 采用实际滑模值 $s_i(k)$ 与滑模预测模型输出值 $s_{mi}(k)$ 的差值产生反馈校正信号, 得到滑模预测模型的闭环输出为

$$\tilde{s}_{mi}(k+1) = s_{mi}(k+1) + \rho_i(s_i(k) - s_{mi}(k)), \quad (27)$$

其中 $\rho_i \in \mathbf{R}$ 是加权系数, $0 < \rho_i \leq 1$. 选择合适的 ρ_i , 可以补偿滑模预测模型的误差并提高滑模控制器的

性能. 设 $\bar{s}_i(k) = s_i(k) - s_{mi}(k)$, 式 (27) 简化为

$$\tilde{s}_{mi}(k+1) = s_{mi}(k+1) + \rho_i \bar{s}_i(k). \quad (28)$$

一方面, 由于 AUV 状态变量 $\mathbf{x}_i(k)$ 是可测的, $s_i(k)$ 可以求得; 另一方面, 延迟一步式 (26) 可得

$$s_{mi}(k) = f_i(\mathbf{x}(k-1)) + g_i(\mathbf{x}(k-1))\tau_i(k-1) + \sigma_i x_{2i}(k-1) + \gamma_i s_i(k-1). \quad (29)$$

显然, $s_{mi}(k)$ 与系统的历史信息有关, 在 k 时刻能够获得, 因此可得到 $\bar{s}_i(k)$. 将式 (26) 代入 (28) 得

$$\begin{aligned} \tilde{s}_{mi}(k+1) &= \\ f_i(\mathbf{x}(k)) + g_i(\mathbf{x}(k))\tau_i(k) + \\ \sigma_i x_{2i}(k) + \gamma_i s_i(k) + \rho_i \bar{s}_i(k) &= \\ h_i(k) + g_i(\mathbf{x}(k))\tau_i(k), \end{aligned} \quad (30)$$

其中 $h_i(k) = f_i(\mathbf{x}(k)) + \sigma_i x_{2i}(k) + \gamma_i s_i(k) + \rho_i \bar{s}_i(k)$. 为了实现滚动优化控制, 选取二次性能指标为

$$\begin{aligned} \min J_i &= (\tilde{s}_{mi}(k+1) - s_r)^2 + \lambda_i (\tau_i(k))^2, \\ i &= 1, 2, \dots, 5. \end{aligned} \quad (31)$$

其中: s_r 是滑模参考值; λ_i 是控制量加权系数, 用来调整预测滑模的闭环输出与控制输入的关系. 由于控制目标是确保状态在滑模面上运动, 期望的滑模参考值应该是 $s_r = 0$. 性能指标 (31) 可简写为

$$\begin{aligned} \min J_i &= (\tilde{s}_{mi}(k+1))^2 + \lambda_i (\tau_i(k))^2, \\ i &= 1, 2, \dots, 5. \end{aligned} \quad (32)$$

将式 (30) 代入 (32) 可得

$$\begin{aligned} \min J_i &= (h_i(k) + g_i(\mathbf{x}(k))\tau_i(k))^2 + \lambda_i (\tau_i(k))^2, \\ i &= 1, 2, \dots, 5. \end{aligned} \quad (33)$$

令 $\partial J_i / \partial \tau_i(k) = 0$, 即可求得方程的最优解为

$$\tau_i(k) = -\frac{h_i(k)g_i(\mathbf{x}(k))}{g_i^2(\mathbf{x}(k)) + \lambda_i}, \quad i = 1, 2, \dots, 5. \quad (34)$$

至此得到 AUV 空间航迹跟踪控制系统的控制输入为

$$\begin{aligned} \tau(\mathbf{x}(k)) &= [X_{\text{prop}}(k), X_{\text{prop}}(k), X_{\text{prop}}(k), \\ M_{\text{prop}}(k), N_{\text{prop}}(k)]. \end{aligned} \quad (35)$$

3.3 鲁棒稳定性分析

针对欠驱动 AUV 空间航迹跟踪控制系统 (24) 和切换函数 (25), 存在

$$\begin{aligned} s_i(k+1) &= x_{2i}(k+1) + \sigma_i x_{2i-1}(k+1) = \\ f_i(\mathbf{x}(k)) + g_i(\mathbf{x}(k))\tau_i(k) + \varpi_i(k) + \sigma_i x_{2i}(k). \end{aligned} \quad (36)$$

将控制律 (34) 代入 (36) 得

$$\begin{aligned} s_i(k+1) &= \\ f_i(\mathbf{x}(k)) - \frac{h_i(k)g_i^2(\mathbf{x}(k))}{g_i^2(\mathbf{x}(k)) + \lambda_i} + \varpi_i(k) + \sigma_i x_{2i}(k) &= \\ f_i(\mathbf{x}(k)) - h_i(k) + \sigma_i x_{2i}(k) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varpi_i(k) + \frac{\lambda_i h_i(k)}{g_i^2(\mathbf{x}(k)) + \lambda_i} = \\ -\gamma_i s_i(k) - \rho_i \bar{s}_i(k) + \varpi_i(k) + \frac{\lambda_i h_i(k)}{g_i^2(\mathbf{x}(k)) + \lambda_i}. \end{aligned} \quad (37)$$

对于滑模预测模型 $s_{mi}(k)$, 存在

$$\begin{aligned} s_{mi}(k) &= \\ f_i(\mathbf{x}(k-1)) + g_i(\mathbf{x}(k-1))\tau_i(k-1) + \\ \sigma_i x_{2i}(k-1) + \gamma_i s_i(k-1) &= \\ x_{2i}(k) - \varpi_i(k-1) + \sigma_i x_{2i-1}(k) + \gamma_i s_i(k-1) &= \\ s_i(k) + \gamma_i s_i(k-1) - \varpi_i(k-1), \end{aligned} \quad (38)$$

因此得到

$$\begin{aligned} \bar{s}_i(k) &= s_i(k) - (s_i(k) + \gamma_i s_i(k-1) - \varpi_i(k-1)) = \\ -\gamma_i s_i(k-1) + \varpi_i(k-1). \end{aligned} \quad (39)$$

将式 (39) 代入 (37) 得

$$\begin{aligned} s_i(k+1) &= -\gamma_i s_i(k) - \rho_i (-\gamma_i s_i(k-1) + \\ \varpi_i(k-1)) + \varpi_i(k) + \frac{\lambda_i h_i(k)}{g_i^2(\mathbf{x}(k)) + \lambda_i} &= \\ \gamma_i (-s_i(k) + \rho_i s_i(k-1)) + (\varpi_i(k) - \\ \rho_i \varpi_i(k-1)) + \frac{\lambda_i h_i(k)}{g_i^2(\mathbf{x}(k)) + \lambda_i} &= \\ Q_{1i} + Q_{2i} + Q_{3i}. \end{aligned} \quad (40)$$

其中

$$\begin{aligned} Q_{1i} &= \gamma_i (-s_i(k) + \rho_i s_i(k-1)), \\ Q_{2i} &= \varpi_i(k) - \rho_i \varpi_i(k-1), \quad Q_{3i} = \frac{\lambda_i h_i(k)}{g_i^2(\mathbf{x}(k)) + \lambda_i}. \end{aligned}$$

定理 1 对于由式 (24), (25) 和 (34) 组成的闭环系统, 如果存在

$$\begin{aligned} |Q_{2i}| = |\varpi_i(k) - \rho_i \varpi_i(k-1)| \leq \varepsilon_i, \\ i = 1, 2, \dots, 5, \end{aligned} \quad (41)$$

其中 ε_i 是正常数, 则系统是鲁棒稳定的.

证明 令 $M_i = -s_i(k) + \rho_i s_i(k-1)$, 则 M_i 的特征方程为

$$-1 + \rho_i z^{-1} = 0, \quad (42)$$

特征方程的根是 $z = \rho_i$. 由于 $0 < \rho_i \leq 1$, M_i 是稳定的; 同时, 由于 $0 < \gamma_i \leq 1$, 存在 $\forall \bar{\rho} > 0$, 当 $k > k_{0i}$ 时, $\exists k_{0i} < \infty$ 使得 $|Q_{1i}| < \bar{\rho}_i$. 另外, $\forall \bar{\lambda}_i > 0$, 存在控制量加权系数 $\lambda_i (0 < \lambda_i \leq 1)$ 使得下式成立:

$$|Q_{3i}| = \left| \frac{\lambda_i h_i(k)}{g_i^2(\mathbf{x}(k)) + \lambda_i} \right| \leq \bar{\lambda}_i. \quad (43)$$

结合式 (41) 得到

$$\begin{aligned} |s_i(k+1)| &= |Q_{1i} + Q_{2i} + Q_{3i}| \leq \\ |Q_{1i}| + |Q_{2i}| + |Q_{3i}| &\leq \\ \bar{\rho}_i + \bar{\lambda}_i + \varepsilon_i &= \bar{\varepsilon}_i. \end{aligned} \quad (44)$$

因此, AUV 空间航迹跟踪控制系统的实际滑模运动必将收敛到滑模面的 ε_i 邻域, 并随后保持在其中. 另外, 因为滑模面的稳定性和不变性已经由式 (25) 保证, 所以闭环系统在控制律 (34) 的作用下是鲁棒稳定的. \square

由控制律 (34) 可知, 控制输入能够提供驱使系统在任意偏离理想滑模面时, 均能在一步之内返回滑模面 (名义系统) 或滑模带 (不确定系统) 的控制力. 显然, 这样的趋近过程和系统的动态响应是最快的, 但也意味着求得的控制量可能过大, 超过了实际系统执行机构的允许范围. 为了解决此问题, 可采用工程上常用的限幅方法. 设执行机构的最大允许控制量为 $\pm\tau_{i\max}(k)$, 则实际加到执行机构的控制量为

$$\tau_i(k) = \begin{cases} \tau_i(k), & \|\tau_i(k)\| < \tau_{i\max}(k); \\ \frac{\tau_i(k)}{\|\tau_i(k)\|} \tau_{i\max}(k), & \|\tau_i(k)\| \geq \tau_{i\max}(k). \end{cases} \quad (45)$$

4 仿真研究

仿真实验对象为哈尔滨工程大学北飒海洋装置与控制技术研究所自主研发的某型欠驱动 AUV, 基于半物理仿真平台, 针对由实测水动力系数构建的 6 自由度非线性模型, 采用本文的控制方法, 验证了 AUV 在非定常海流干扰条件下对于三维航迹的精确跟踪能力.

设定由声纳探测采样得到的期望航迹跟踪曲线 (m) 为

$$y_P = 100 \sin\left(\frac{x_P}{200}\pi\right), \quad z_P = 35 + 30 \sin\left(\frac{x_P}{200}\pi\right). \quad (46)$$

考虑外界海流干扰对欠驱动 AUV 的影响, 海流流速 (kn) 为

$$u_{\text{cur}} = \begin{cases} 2.0, & 0 \leq z \leq 15; \\ 1.5, & 15 < z \leq 55; \\ 1.0, & 55 < z \leq 65; \end{cases} \quad (47)$$

流向为 0° (与 X 轴夹角). 设 AUV 初始位置 (m) 为 $(x, y, z) = (0, 0, 35)$, 初始姿态角为 $(\varphi, \theta, \phi) = (0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$, 初始航速 (m/s) 为 $(u, v, w) = (0, 0, 0)$, 期望航速为 $u_d = 4 \text{ kn}$. 考虑欠驱动 AUV 刚体的长度和跟踪曲线特性, 给定虚拟目标的增益参数 $\kappa = 0.05$, 初始位置 $(x_P, y_P, z_P) = (10, 15, 40)$. 选取控制增益为

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= -0.35, \quad \sigma_2 = -0.1, \quad \sigma_3 = -0.15, \\ \gamma_1 &= \gamma_2 = \gamma_3 = 0.08, \quad \rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = 0.9, \\ \lambda_1 &= 0.15, \quad \lambda_2 = 0.2, \quad \lambda_3 = 0.25. \end{aligned} \quad (48)$$

为了验证 DSMPC 控制器的性能和虚拟向导方法在空间曲线航迹跟踪控制中的有效性, 设计离散

滑模控制器对于 AUV 空间航迹跟踪的仿真数据并加以对比. 图 2 给出了 DSMPC 和 DSMC 两种控制器下空间曲线航迹跟踪的效果图, 图 3 给出了空间航迹跟踪误差对比图. 由图 2 可知, 两种控制器均可实现欠驱动 AUV 在不同海流干扰下的航迹精确跟踪, 与 DSMC 控制器相比, DSMPC 控制器的航迹跟踪偏差有明显改善, 尤其是在海流大小有改变之处, DSMPC 控制器能够更加有效地保证系统的稳定性和鲁棒性. 图 4 为航速误差曲线, 图 5 为设计的虚拟目标 P 点的航速曲线.

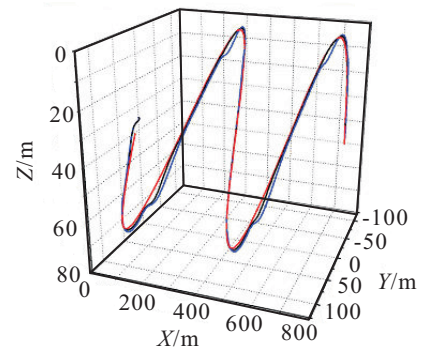


图 2 AUV 空间航迹跟踪曲线

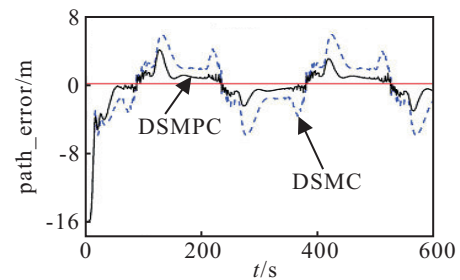


图 3 空间航迹跟踪误差

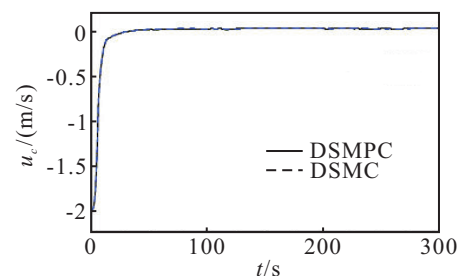


图 4 航速误差曲线

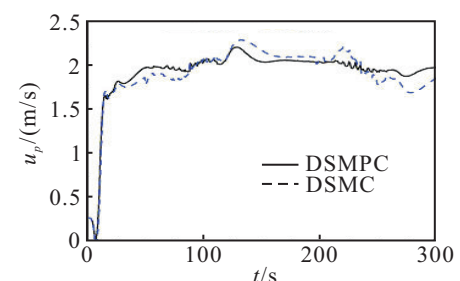


图 5 虚拟目标航速曲线

5 结 论

本文针对欠驱动 AUV 三维航迹跟踪控制问题, 考虑了非线性水动力阻尼对于 AUV 系统的影响和外界海流干扰作用, 提出了基于预测控制思想设计的离散滑模预测控制方法, 利用滚动优化和反馈校正方法补偿了不确定项对滑模预测模型的影响. 通过理论研究和仿真实验可以得到以下结论: 采用基于离散滑模预测控制策略进行欠驱动 AUV 的三维航迹跟踪控制, 可以较好地克服时变非线性水动力阻尼对于系统的影响, 并对外界海流干扰有较好的抑制作用, 达到了精确跟踪的理想效果.

参考文献(References)

- [1] 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: 22-24.
(Jiang X S, Feng X S, Wang L T. Unmanned underwater vehicles[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 2000: 22-24.)
- [2] Wang Y T, Yan W S, Gao B, et al. Backstepping-based path following control of an underactuated autonomous underwater vehicle[C]. Proc of the 2009 IEEE Int Conf on Information and Automation. Zhuhai: IEEE Press, 2009: 466-471.
- [3] Jon E Refsnes, Asgeir J Sorensen, Kristin Y Pettersen. Model-based output feedback control of slender-body underactuated AUVs: Theory and experiments[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2008, 16(5): 930-946.
- [4] Lionel Lapierre, Didik Soetanto. Nonlinear path-following control of an AUV[J]. Ocean Engineering, 2007, 34(2): 1734-1744.
- [5] 唐旭东, 庞永杰, 李晔, 等. 基于混沌过程神经元的水下机器人运动控制方法[J]. 控制与决策, 2010, 25(2): 213-217.
(Tang X D, Pang Y J, Li Y, et al. Chaotic process neuron control for AUVs[J]. Control and Decision, 2010, 25(2): 213-217.)
- [6] Li J H, Lee P M. Path tracking in dive plane for a class of Torpedo-type underactuated AUVs[C]. Proc of the 7th Asian Control Conf. Hong Kong: ACA Press, 2009: 360-365.
- [7] Repoulias F, Papadopoulos E. Trajectory planning and tracking control design of underactuated AUVs[C]. Proc of the IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Barcelona: IEEE Press, 2005: 1622-1627.
- [8] Filoktimon Repoulias, Evangelos Papadopoulos. Planar trajectory planning and tracking control design for underactuated AUVs[J]. Ocean Engineering, 2007, 34(2): 1650-1667.
- [9] 邢志伟, 封锡盛. 水下机器人神经网络自适应逆控制[J]. 控制工程, 2003, 10(3): 235-238.
(Xing Z W, Feng X S. Adaptive inverse control of neural network for underwater vehicles[J]. Control Engineering, 2003, 10(3): 235-238.)
- [10] 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 J C, Zhang A Q, Wang X H, et al. Direct adaptive control of underwater vehicles based on fuzzy neural networks[J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(8): 840-846.)
- [11] 俞建成, 李强, 张艾群, 等. 水下机器人的神经网络自适应控制[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(1): 9-13.
(Yu J C, Li Q, Zhang A Q, et al. Neural network adaptive control for underwater vehicles[J]. Control Theory and Applications, 2008, 25(1): 9-13.)
- [12] 李殿璞. 船舶运动与建模[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1996: 11-12.
(Li D P. Ship motion and modelling[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 1996: 11-12.)
- [13] Papoulias F A. Bifurcation analysis of line of sight vehicle guidance using sliding modes[J]. Int J of Bifurcaion and Chaos, 1991, 1(4): 849-865.
- [14] 汤莉. AUV 神经网络水平面航迹跟踪控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学自动化学院, 2009: 16-18.
(Tang L. Research on the neural network adaptive control for autonomous underwater vehicle's horizontal tracking problem[D]. Harbin: College of Automation, Harbin Engineering University, 2009: 16-18.)
- [15] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 334-336.
(Hu S S. Principle of automatic control[M]. Beijing: Science Press, 2001: 334-336.)
- [16] 宋立忠, 李槐树, 杨志红, 等. 单值预估离散滑模控制及其应用[J]. 控制与决策, 2006, 21(7): 829-832.
(Song L Z, Li H S, Yang Z H, et al. Discrete-time sliding mode predictive control algorithm and its application[J]. Control and Decision, 2006, 21(7): 829-832.)
- [17] Jung ho Kim, Seung Hyun Oh, Dongil Cho, et al. Robust discrete-time variable structure control methods[J]. J of Dynamie Systems, Measurement and Control, 2000, 122(2): 766-775.