

# 遥控潜水器轨迹跟踪自适应模糊滑模控制方法研究

杨建华<sup>1</sup>, 刘卫东<sup>1,2</sup>

(1. 西北工业大学 航海学院, 西安 710072; 2. 水下信息与控制重点实验室, 西安 710072)

**摘要:** 针对 ROV 位置和姿态精确定位控制的难题, 通过对 ROV 数学模型的分析, 设计了 ROV 滑模控制器; 系统通过模糊推理来自适应降低抖振和逼近未知的非线性函数部分, 利用李亚普诺夫稳定性理论证明了该系统的收敛性和稳定性, 最后利用 Simulink 对控制系统进行了仿真研究; 仿真结果表明: 该控制器能够保证轨迹跟踪误差的快速收敛性, 及对外界干扰的鲁棒性, 初始误差 3 s 收敛到零, 验证了理论分析的正确性和有效性。

**关键词:** 滑模控制; 遥控潜水器; 模糊推理

## Adaptive Fuzzy Sliding Mode Trajectory Tracking Control for Remotely Operated Underwater Vehicles

Yang Jianhua<sup>1</sup>, Liu Weidong<sup>1,2</sup>

(1. College of Marine, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Key Laboratory of Science and Technology on Underwater Information and Control, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Sliding mode controller was designed for the Remotely Operated Underwater Vehicles (ROV) to solve the problem of position and attitude precise positioning control. Firstly, the ROV mathematical model is analyzed. Then, the unknown nonlinear function is estimated and chattering is reduced by adaptive fuzzy system. Thirdly, the convergence and stability of the system is proved by using Lyapunov stability theory. Simulation results show that the controller can guarantee fast convergence of tracking error, the robustness to interference, and the validity and correctness of the theoretical analysis. The initial error converges to zero in 3s.

**Keywords:** sliding mode control; remotely operated underwater vehicles; fuzzy reasoning

## 0 引言

遥控潜水器 (remotely operated vehicles, ROV) 是人类探索海洋的工具, 是先进的机器人技术在水下的特殊应用, 是海底科学考察、资源探测及水下工程等方面开发所必需的设备。近年来, 遥控潜水器 (ROV) 的研究倍受重视, 已成为发达国家海洋技术研究的前沿<sup>[1-2]</sup>。遥控潜水器 (ROV) 的控制系统是一种十分复杂的多输入多输出的非线性系统, 具有时变强耦合和非线性的动力学特点。其运动和姿态的精确定位控制系统设计成为该领域科研工作者的一大挑战<sup>[3-4]</sup>, 高性能的 ROV 动力定位控制难点主要存在以下两方面<sup>[5]</sup>:

1) ROV 作业环境存在较大未知干扰, 比如暗流、缆绳的拖曳、浅海作业时海面海浪等。

2) ROV 存在较大的参数不确定性。ROV 很难在每次任务前进行水池试验以得到其众多的水动力参数。一方面是因为这样做会非常昂贵, 另一方面是 ROV 的结构经常会因为任务

的不同而发生变化, 这就使得获取准确的水动力参数变得非常困难。

许多研究文章致力于 ROV 的位置和姿态控制, 并取得了不少研究成果<sup>[6-10]</sup>。文献 [6] 设计了基于神经网络的在线控制方法, 数值仿真实验效果良好, 但系统的实时性差。文献 [7-9] 设计了遥控潜水器的滑模控制器, 但在削弱抖振和控制器的自适应性方面有待进一步研究, 文献 [10] 对遥控潜水器的模型参数进行了辨识。

滑模变结构控制算法简单, 对参数变化不敏感以及极强的抗干扰能力使其在水下机器人运动控制领域得到了广泛的应用。但是, 滑模变结构控制的抖振问题成为变结构控制的在实际系统中应用的突出障碍。因此, 关于如何削弱抖振成为滑模变结构控制研究的首要问题, 国内外许多学者从不同角度提出了很多解决方案<sup>[11-14]</sup>。本文通过对 ROV 数学模型的分析和在合理假设基础上的简化, 设计了 ROV 滑模控制器, 通过模糊推理系统来降低抖振和逼近未知的非线性函数部分, 进一步提高控制器的自适应性及鲁棒性。

## 1 系统描述

### 1.1 坐标系及坐标变换

为了研究遥控潜水器 (ROV) 的空间运动规律, 需要建立合适的坐标系, 一般遥控潜水器的坐标系分为载体坐标系和固定坐标系。两种坐标系下有着不同的表示方法, 这两种方法可以方便地互相转换。两种描述方法有着不同的性质, 利用这

收稿日期: 2014-01-03; 修回日期: 2014-03-10。

基金项目: 水下信息与控制重点实验室基金(9140C2302061001); 船舶预研基金(08J3.9.9)。

作者简介: 杨建华(1980-), 男, 陕西西安市人, 博士研究生, 主要从事水下航行器导航与控制、控制理论与控制工程方向的研究。

刘卫东(1962-), 男, 陕西西安人, 博导, 教授, 主要从事水下航行器导航与控制系统、计算机测控系统及计算机仿真等方向的研究。

些性质可以简化控制器设计的过程。在固定坐标系 (OXYZ) 中, O 取为水面一点, OX 轴水平指向 ROV 主航向, OZ 指向下方即地心, OY 按右手法则确定。在载体坐标系 (O<sub>B</sub>X<sub>B</sub>Y<sub>B</sub>Z<sub>B</sub>) 中, 原点 O<sub>B</sub> 固定于遥控潜水器的重心, O<sub>B</sub>X<sub>B</sub> 指向 ROV 正前方, O<sub>B</sub>Y<sub>B</sub> 指向 ROV 右舷侧, O<sub>B</sub>Z<sub>B</sub> 指向 ROV 腹部下方, 如图 1 所示。固定坐标系和运动坐标系之间的变换关系为:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, S 为变换矩阵。

$$S = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & \cos\psi\sin\theta\sin\varphi - \sin\psi\sin\varphi & \cos\psi\sin\theta\cos\varphi + \sin\psi\sin\varphi \\ \sin\psi\cos\theta & \sin\psi\sin\theta\sin\varphi + \cos\psi\cos\varphi & \sin\psi\sin\theta\cos\varphi + \cos\psi\sin\varphi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\varphi & \cos\theta\cos\varphi \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中:  $\psi$  为 ROV 的航向角,  $\theta$  纵倾角,  $\varphi$  横倾角。

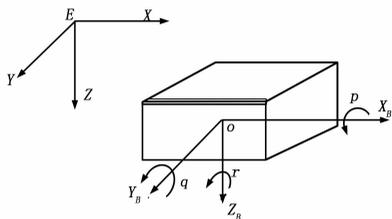


图 1 固定坐标系和载体坐标系

1.2 用于控制的潜水器动力学非线性建模

用一个合理模型来描述水下潜航器的动态行为, 该模型必须包含潜航器本身的刚体动力学以及流体动力学。这样一个模型必须由代表刚体动力学的普通微分方程和代表缆绳和流体动力学的偏微分方程来组成。为了克服计算的复杂程度, 大多数研究用集总参数方法来近似潜航器的动力学行为。水下潜航器的运动方程可以由固定坐标系和载体坐标系中表示, 如图 1 所示。在艇体坐标系中, ROV 运动的动力学方程表示为<sup>[14]</sup>:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) + P = \tau \quad (3)$$

$$\dot{\eta} = J(\eta)v \quad (4)$$

式中,  $v = [u \ v \ w \ p \ q \ r]^T$  为 ROV 在载体坐标系中的空间速度状态向量 (速度和角速度),  $\eta = [x \ y \ z \ \varphi \ \theta \ \psi]^T$  为 ROV 在固定坐标系中的位置和姿态状态向量,  $J(\eta)$  为固定坐标系和载体坐标系之间通过欧拉角转换的空间转换矩阵。M 为 ROV 包括附加质量的惯性矩阵, C(v) 为包括附加质量的科氏力和向心力矩阵, D(v) 为水动力阻尼矩阵, g(η) 为重力和浮力产生的力和力矩向量, τ 为推进系统产生的控制力/力矩向量, P 为未知有界六自由度干扰力/力矩向量, 主要由海流、挤带缆拖拽力和机械手作业时的反作用力等产生。将式 (3) 在载体坐标系下的运动数学模型转化为在惯性坐标系下的数学模型为:

$$M_\eta(\eta)\ddot{\eta} + C_\eta(v, \eta)\dot{\eta} + D_\eta(v, \eta)\dot{\eta} + g_\eta(\eta) + P_\eta = \tau_\eta \quad (5)$$

其中:

$$M_\eta(\eta) = J^{-T}MJ^{-1}$$

$$C_\eta(v, \eta) = J^{-T}[C - MJ^{-T}J]J^{-1}D_\eta(v, \eta) =$$

$$J^{-T}DJ^{-1}g(\eta) = J^{-T}gP_\eta = J^{-T}P_\eta\tau_\eta = J^{-T}\tau_\eta.$$

由于遥控潜水器在水下的运动速度一般比较慢, 假设系统的横倾和纵倾角稳定不需要直接控制。为了简化控制器设计难

度对具有强耦合性的系统解耦化简整理得每个自由度的数学模型为:

$$\ddot{\eta}_i = M_\eta^{-1}(\tau_{\eta_i} - C_{\eta_i} - D_{\eta_i} - P_{\eta_i}) \quad i = 1, 2, \dots, 4 \quad (6)$$

假定 ROV 动力学具有如下结构特性:

假设 1: 惯性矩阵  $M_\eta$  是对称正定矩阵, 即:  $M_\eta^T = M_\eta, 0 < M_{\eta_{\min}} \leq M_\eta \leq M_{\eta_{\max}}$ 。

假设 2: 惯性矩阵  $\dot{M}_\eta - 2C_\eta$  是斜对称矩阵, 即: 对任意向量  $\xi, \xi^T(\dot{M}_\eta - 2C_\eta)\xi = 0$ 。

2 轨迹跟踪自适应模糊滑模控制

ROV 轨迹跟踪问题是一个典型的多变量控制问题, 具有时变强耦合和非线性的动力学特点。ROV 的开架式结构使得其模型具有不确定性, 水下环境十分复杂, 外部干扰比较大, 常规的设计方法较难于设计这类控制器。滑模变结构控制的主要特点在于其反馈控制信号不连续, 在状态空间的一个或多个平面上来回切换。当系统的状态穿过切换平面时, 控制器的结构发生改变。在一定的条件下, 切换平面以外的任一系统状态在变结构控制的控制作用下会趋近于切换平面, 并在切换平面上产生滑动运动。当系统处于滑动模态时, 系统对于被控对象的模型的不确定性以及外干扰具有不变性, 因此特别适合于不确定非线性系统的跟踪控制。但是滑模变结构控制对系统参数扰动和外部干扰的不变性是以控制量的高频抖振换取的, 高频抖振容易激发系统的未建模特性, 影响系统的控制性能。抖振问题成为变结构控制的在实际系统中的应用突出障碍。

滑模控制的抖振大小是由其控制器切换项的增益决定的, 采用模糊推理系统对切换项增益进行调节, 可降低滑模控制的抖振。另外控制系统的部分非线性函数参数很难观测到, 给系统设计和仿真带来困难, 本文采用模糊系统输出近似逼近非线性函数, 实现自适应模糊滑模控制, 系统结构框图如图 2 所示。

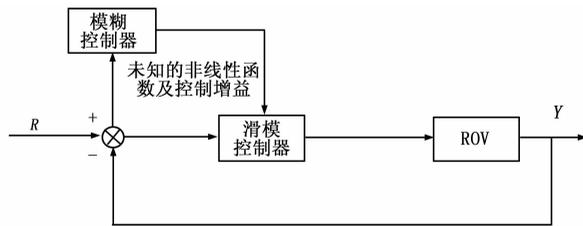


图 2 模糊滑模控制系统结构

假设 ROV 的期望水平面运动状态有界:  $\|\eta_d\| \leq \eta_b, \eta_d$  为惯性坐标系下的期望轨迹,  $\eta_b$  为正常数。状态向量  $\eta_i$  和  $\dot{\eta}_i$  可观测的,  $\eta_{di}$  和  $\dot{\eta}_{di}$  至少一阶可微。

定义 ROV 跟踪误差为:

$$e_i = \eta_i - \eta_{di} \quad (7)$$

$\eta_{di}$  为每个自由度的期望轨迹。

设计滑模面为:

$$s_i(t) = c_i e_i + \dot{e}_i, \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (8)$$

其中:  $c_i > 0$ 。控制器设计的目标是每个自由度  $s_i \rightarrow 0$ 。

式 (8) 的时间导数是:

$$\dot{s}_i(t) = c_i \dot{e}_i + \ddot{e}_i = c_i \dot{e}_i + \ddot{\eta}_i - \ddot{\eta}_{di} = c_i \dot{e}_i + M_\eta^{-1}(\tau_{\eta_i} - C_{\eta_i} - D_{\eta_i} - g_{\eta_i} - P_{\eta_i}) - \ddot{\eta}_{di} \quad (9)$$

如果系统的非线性函数已知, 则如下的控制律可以达到控制目标:

$$\tau_i = C_{\eta_i} + D_{\eta_i} + g_{\eta_i} + P_{\eta_i} +$$

$$M_{\dot{\eta}}(K_i \operatorname{sgn}(s_i) - c_i e_i + \ddot{\eta}_{di}) \quad (10)$$

这里  $\operatorname{sgn}(\cdot)$  被定义为:

$$\operatorname{sgn}(s_i) = \begin{cases} -1, & \text{if } s_i < 0; \\ 0, & \text{if } s_i = 0; \\ 1, & \text{if } s_i > 0. \end{cases} \quad (11)$$

如果系统的非线性函数未知, 采用自适应模糊推理系统估计未知的非线性系统函数。则式 (6) 可写为:

$$\tau_i = \hat{C}_{\dot{\eta}} + \hat{D}_{\dot{\eta}} + \hat{g}_{\dot{\eta}} + \hat{P}_{\dot{\eta}} + M_{\dot{\eta}}(K_i \operatorname{sgn}(s_i) - c_i e_i + \ddot{\eta}_{di}) \quad (12)$$

式中,  $\hat{C}_{\dot{\eta}}, \hat{D}_{\dot{\eta}}, \hat{g}_{\dot{\eta}}, \hat{P}_{\dot{\eta}}, M_{\dot{\eta}}$  为估计值。

对未知的非线性函数部分做如下假定:

假定 1:  $C_{\dot{\eta}}$  和  $D_{\dot{\eta}}$  未知但有界, 即:  $|\hat{C}_{\dot{\eta}} - C_{\dot{\eta}}| \leq \kappa_i$  和  $|\hat{D}_{\dot{\eta}} - D_{\dot{\eta}}| \leq \kappa_i \zeta_i$ ;

假定 2:  $P_{\dot{\eta}}$  未知但有界, 即:  $|P_{\dot{\eta}}| \leq \delta_i$ 。

设模糊系统由 IF-THEN 形式的模糊规则构成:

$$R^{(j)}: \text{IF } s_i = s_{ir} \text{ then } \hat{h}_{ir} = \hat{\theta}_{ir}$$

其中:  $s_{ir}$  为模糊集, 参数  $\hat{h}_{ir}$  为非线性函数的近似值替代,  $\hat{\theta}_{ir}$  是每个模糊规则的输出值, 模糊系统的最终输出值为:

$$\hat{h}_i(s_i) = \frac{\sum_{r=1}^n \omega_{ir} \cdot \hat{\theta}_{ir}}{\sum_{r=1}^R \omega_{ir}} \quad (13)$$

引入向量  $\psi_i(s_i)$ , 式 (13) 也可以缩写为:

$$\hat{h}_i(s_i) = \hat{\theta}_i^T \psi_i(s_i) \quad (14)$$

其中:

$$\hat{\theta}_i = [\hat{\theta}_{i1}, \hat{\theta}_{i2}, \dots, \hat{\theta}_{iR}]^T$$

$$\psi_i(s_i) = [\psi_{i1}, \psi_{i2}, \dots, \psi_{iR}]$$

其元素为:

$$\psi_{ir}(s_i) = \frac{\omega_{ir}}{\sum_{r=1}^R \omega_{ir}} \quad (15)$$

为了获得合适的  $\hat{h}_i(s_i)$ , 设计如下的自适应律:

$$\dot{\hat{\theta}}_i = -\varphi_i s_i \psi_i(s_i) \quad (16)$$

其中:  $\varphi_i$  为与适应律相关的一个严格正定的常数。

为了保证控制系统的稳定性和收敛性, 定义 Lyapunov 函数为:

$$V_i(t) = \frac{1}{2} s_i^2 + \frac{1}{2\mu_i \hat{M}_i \varphi_i} \Delta_i^T \Delta_i \quad (17)$$

其中,  $\Delta_i = \hat{\theta}_i - \hat{\theta}_i^*$ ,  $\hat{\theta}_i^*$  为最优参数向量。这样可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_i(t) &= s_i \dot{s}_i + (\mu_i \hat{M}_i \varphi_i)^{-1} \Delta_i^T \dot{\Delta}_i = \\ &= (c_i \dot{e}_i + \ddot{\eta}_i - \ddot{\eta}_{di}) s_i + (\mu_i \hat{M}_i \varphi_i)^{-1} \Delta_i^T \dot{\Delta}_i = \\ &= [M_{\dot{\eta}}^{-1} (\tau_{\dot{\eta}} - C_{\dot{\eta}} - D_{\dot{\eta}} - g_{\dot{\eta}} - P_{\dot{\eta}}) + \\ &\quad c_i \dot{e}_i - \ddot{\eta}_{di}] s_i + (\mu_i \hat{M}_i \varphi_i)^{-1} \Delta_i^T \dot{\Delta}_i \end{aligned} \quad (18)$$

定义一个最小逼近误差:

$$\varepsilon_i = \hat{h}_i^* - \hat{h}_i, \text{ 且 } \dot{\Delta}_i = \dot{\hat{\theta}}_i, \mu_i^{-1} \leq \hat{M}_i / M_i \leq \mu_i$$

则有

$$\begin{aligned} \dot{V}_i(t) &\leq -[K_i \operatorname{sgn}(s_i) - (\hat{C}_{\dot{\eta}} - C_{\dot{\eta}}) - (\hat{D}_{\dot{\eta}} - D_{\dot{\eta}}) - (\hat{P}_{\dot{\eta}} - \\ &P_{\dot{\eta}}) - \varepsilon_i + \hat{M}_i (\mu_i - 1) (\ddot{\eta}_{di} - c_i \dot{e}_i) (\mu_i \hat{M}_i)^{-1} s_i + (\mu_i \hat{M}_i \varphi_i)^{-1} \Delta_i^T \dot{\Delta}_i = \\ &= -[K_i \operatorname{sgn}(s_i) - (\hat{C}_{\dot{\eta}} - C_{\dot{\eta}}) - (\hat{D}_{\dot{\eta}} - D_{\dot{\eta}}) - \Delta_i^T \psi_i(s_i) - \varepsilon_i + \\ &\quad \hat{M}_i (\mu_i - 1) (\ddot{\eta}_{di} - c_i \dot{e}_i) (\mu_i \hat{M}_i)^{-1} s_i + (\mu_i \hat{M}_i \varphi_i)^{-1} \Delta_i^T \dot{\Delta}_i = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= -[K_i \operatorname{sgn}(s_i) - (\hat{C}_{\dot{\eta}} - C_{\dot{\eta}}) - (\hat{D}_{\dot{\eta}} - D_{\dot{\eta}}) - \varepsilon_i + \hat{M}_i (\mu_i - 1) \\ &\quad (\ddot{\eta}_{di} - c_i \dot{e}_i) (\mu_i \hat{M}_i)^{-1} s_i + (\mu_i \hat{M}_i \varphi_i)^{-1} \Delta_i^T [\dot{\Delta}_i + \varphi_i s_i \psi_i(s_i)] \end{aligned} \quad (19)$$

又通过  $|\varepsilon_i| = |\hat{h}_i^* - h_i| \leq |\hat{h}_i - h_i| \leq |\hat{h}_i| + \delta_i$  以及自适应律式 (16) 和前文的相关假设可得:

$$\dot{V}_i(t) \leq -\beta_i |s_i| \quad (20)$$

也就是  $V_i(t) \leq V_i(0)$  以及  $s_i, \dot{s}_i$  和  $\Delta_i$  有界, 对上式两边取积分得:

$$\lim_{t \rightarrow 0} \int_0^t \eta_i |s_i| d\theta \leq \lim_{t \rightarrow 0} [V_i(0) - V_i(t)] \leq V_i(0) < \infty$$

根据 Barbalat 引理, 可得: 当  $t \rightarrow \infty$  时,  $s_i \rightarrow 0$ 。

### 3 仿真研究

根据以上建立的动力学模型和控制系统, 本文采用 Matlab Simulink 对水下机器人跟踪期望轨迹进行了仿真分析。采用四阶龙格-库塔法, 控制系统采样率取为 600 Hz, 动态模型模型采样率为 1 kHz, ROV 模型参数选择为  $M = \operatorname{diag}\{85, 85, 105, 20\}$ ,  $D = [125, 160, 220, 15]$ , 每个自由度为三角形模糊隶属函数, 中心值定义为  $E = [-5, -0.5, 1, 0, 0.5, 1, 5]$ , 每个迭代步骤按照自适应律自动更新数据, 自适应参数取为:  $\varphi_i = 50, \beta_i = 1.5$ 。

仿真一: 在二维平面内在初始误差为 (0.2, 0.3, 0.5) 条件下, 跟踪圆心在 (0, 0), 半径为 1 m 的圆。

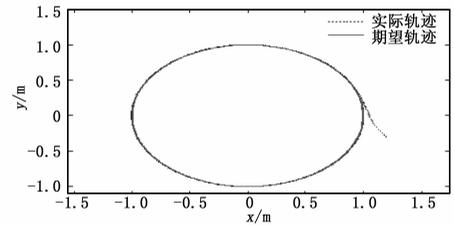


图 3 自适应模糊滑模控制圆轨迹的跟踪曲线

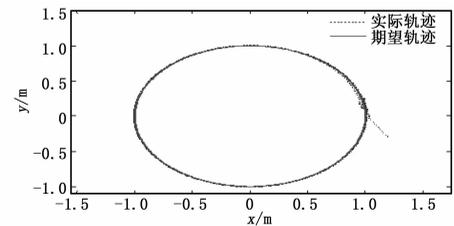


图 4 普通滑模控制圆轨迹的跟踪曲线

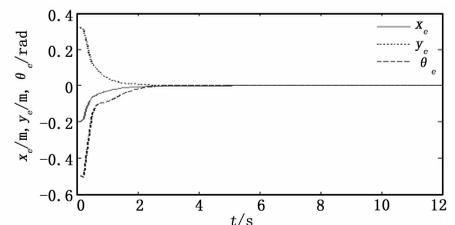


图 5 自适应模糊滑模控制误差曲线

圆轨迹跟踪仿真曲线如图 3~图 6 所示。从图 3 可以看出, 自适应模糊滑模控制具有良好的跟踪效果和全局稳定性。从图 5 和图 6 中可以看出, 自适应模糊滑模控制误差不到 3 s

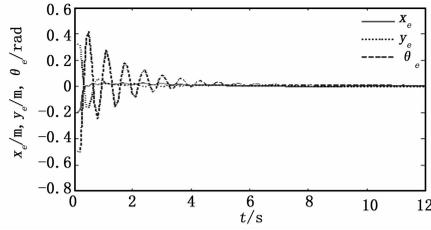


图 6 普通滑模控制误差曲线

进入稳态, 初始跟踪误差很快收敛到零。普通滑模控制误差 6 s 后才逐渐进入稳态, 而且误差曲线振荡严重。

仿真二: 在三维空间内控制 ROV 使其从  $x = 0, y = 3 \text{ m}, z = -2 \text{ m}$  沿期望轨迹到达  $x = 25 \text{ m}, y = 0, z = -15 \text{ m}$ , 平均误差信号为零。

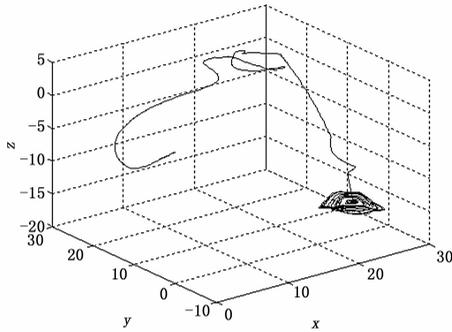


图 7 三维轨迹跟踪曲线

通过三维轨迹跟踪曲线图可以观察到, 系统能够较好的按照规划轨迹, 控制 ROV 到达参考的目标位置。在靠近目标点时有微小振荡但平均误差量趋近零。

### 4 结论

本文通过对 ROV 数学模型的分析, 设计了模糊滑模控制器, 并进行了稳定性分析。计算机仿真结果表明系统能够在干扰未知的情况下, 模糊自适应滑模控制相比普通滑模控制具有更好的全局稳定性和跟踪效果。

(上接第 2437 页)

度和快速性两者兼顾的需求, 本文设计的加入低通滤波回路去校正转台位置的新的转位控制方法, 有效地减小了转位误差和陀螺本身的误差对寻北精度的影响, 在较短时间内显著改善寻北仪的寻北精度, 是值得深入研究的一种较理想的动态寻北控制方法, 尤其是在实际工程应用方面, 本文具有一定的参考价值 and 借鉴意义。

### 参考文献:

[1] Titterton D H, Weston J L. Strapdown inertial navigation technology (2nd Edition) [M]. USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2004: 196 - 197.

[2] 刘宇波, 高立民, 赵天宇. 光纤陀螺寻北仪误差系统分析 [J]. 红外与激光工程, 2007, 9 (36): 570 - 573.

[3] 高茂林, 赵忠, 张钧. 二位置陀螺寻北仪及转位误差分析 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 14 (1): 70 - 71.

### 参考文献:

[1] 晏勇, 马培菀, 等. 深海 ROV 及其作业系统综述 [J]. 机器人, 2005, 27 (1): 82 - 89.

[2] 边宇枢, 高志慧, 等. 6 自由度水下机器人动力学分析与运动控制 [J]. 机械工程学报, 2007, 43 (7): 87 - 92.

[3] 黄海. 遥控潜水器的控制体系结构及作业技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.

[4] 唐旭东, 庞永杰, 李晔. 水下机器人运动的免疫控制方法 [J]. 电机与控制学报, 2007, 11 (6): 676 - 680.

[5] 朱康武, 顾临怡. 作业型遥控水下运载器的多变量 backstepping 鲁棒控制 [J]. 控制理论与应用, 2011, 28 (10): 1441 - 1446.

[6] 俞建成, 张艾群, 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.

[7] Soylu S, Buckham B J, Podhorodeski R P. A chattering-free sliding-mode controller for underwater vehicles with fault-tolerant infinity-norm thrust allocation [J]. Ocean Engineering, 2008, (35): 1647 - 1659.

[8] Bessa W M, Dutra M S, Kreuzer E. An adaptive fuzzy sliding mode controller for remotely operated underwater vehicles [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2010, (58): 16 - 26.

[9] Ho H F, Wong Y K, Rad A B. Adaptive fuzzy sliding mode control with chattering elimination for nonlinear SISO systems [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2009, (17): 1199 - 1210.

[10] Avila J P J, Donha D C, Adamowski J C. Experimental model identification of open-frame underwater vehicles [J]. Ocean Engineering, 2013, (60): 81 - 94.

[11] 刘金琨, 孙富春. 滑模变结构控制理论及其算法研究与进展 [J]. 控制理论与应用, 2007, 24 (3): 407 - 415.

[12] 曹永辉, 石秀华, 许晖. 水下航行器水平面运动的滑模控制 [J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25 (4): 337 - 341.

[13] 王一云, 严卫生, 等. 基于滑模变结构控制滤波的水下机器人水平面轨迹跟踪控制 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (2): 382 - 385.

[14] Bessa W M, Dutra M S, Kreuzer E. Depth control of remotely operated underwater vehicles using an adaptive fuzzy sliding mode controller, Robotics and Autonomous Systems, 2008, 56 (8): 670 - 677.

[4] 王立冬, 王夏霄, 张春熹. 光纤陀螺寻北仪多位置寻北误差分析 [J]. 压电与声光, 2007, 29 (1): 42 - 44.

[5] Pavlath G. Challenges in the development of the IFOG [A]. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibition [C]. Austin, Texas, 2003: 11 - 14.

[6] 梁晓鹏. 基于光纤陀螺的寻北仪技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 13.

[7] 郑秋丽. 光纤陀螺寻北仪误差分析及补偿技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011: 18.

[8] 刘东波, 刘建业, 赖际舟. 基于光纤陀螺的单周快速动态寻北算法研究 [J]. 传感器与微系统, 2007, 26 (11): 61 - 64.

[9] 于志伟, 曾鸣, 乔大鹏. 采用复合控制的直流力矩电机摩擦补偿 [J]. 电机与控制学报, 2008, 12 (5): 539 - 544.

[10] 刘东波, 刘建业, 赖际舟. 应用小波变换的光纤陀螺动态寻北 [J]. 应用科学学报, 2008, 26 (1): 95 - 99.