

水下机器人抗波浪扰动动力定位研究

刘慧婷¹, 张明¹, 曾庆军¹, 眭翔², 宋振文³

(1. 江苏科技大学 电子信息学院, 江苏 镇江 212003; 2. 常州信息职业技术学院机电工程学院, 江苏 常州 213164;
3. 江苏科技大学 计算机科学与工程学院, 江苏 镇江 212003)

摘要: 针对水下机器人近水面运动受到波浪干扰而产生的不确定性问题, 结合所研制的新型海洋工程模态切换机器人 MC-ROV, 文章基于 CFD 法建立动力学模型, 进行 6DOF 动力定位分析; 根据定位误差设计力和力矩分配策略, 采用非奇异终端滑膜控制 (NTSM) 对推力予以补偿, 以减小由波浪等随机带来的影响, 并采用无味卡尔曼 (UKF) 实时估计水下机器人的状态; 仿真结果表明, 该方法具有良好的动力定位效果, 并且在受扰动后可以迅速调整动力分配策略, 减小其带来的负面影响。

关键词: 水下机器人; 动力定位; 扰动; 非奇异终端滑动模型; 无味卡尔曼

Research on Dynamic Positioning of ROV Anti-waves

Liu Huiting¹, Zhang Ming¹, Zeng Qingjun¹, Sui Xiang², Song Zhenwen³

(1. School of Electronic and Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China;
2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Changzhou College of Information, Changzhou 213164, China;
3. School of Computer Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: In terms of the uncertainties induced by wave disturbances when an underwater vehicle is operated by the surface of water and combined with the novelty Model-Converted Remotely Operated Vehicle (MC-ROV) of ocean engineering, a dynamic model based on CFD is built to analyse 6DOF positioning. A strategy of force and moment allocations is designed according to positioning error, then compensating it with an algorithm known as Non-singular Terminal Sliding Model (NTSM) to low the impact brought by waves likewise. Meanwhile Unscented Kalman Filter (UKF) is utilized to estimate the real-time states of the vehicle. Simulation results present that this algorithm makes the underwater vehicle reach a pre-given position rapidly and effectively, and it can adjust the strategy of force and moment promptly when encounters with perturbations so that reduces the negative effects.

Keywords: remotely operated vehicle; dynamic positioning; disturbance; NTSM; UKF

0 引言

水下机器人被用于各种水下作业, 在探索、检修、监控等方面发挥极为重要的作用。水下机器人动力定位是利用一系列使动装置 (主要为推进器) 使其保持在某一特定位置和角度。动力定位系统由传感器、控制器、滤波算法和推进器等组成, 不仅要克服系统本身的高度非线性和耦合性, 还要注意外部干扰如波浪、海流等^[1]。由于水下机器人的动态行为在很大程度上决定于推力的大小和方向, 因此对推进器实施恰当的控制策略十分重要。

目前, 已有众多的学者研究水下机器人动力定位方法, 取得了丰硕成果。一直以来, 扩展卡尔曼 (extended kalman filter, EKF) 和 PID 常被用于动力定位控制, Balchen 与 Grimble 等人都曾提出相关的改进算法并获得良好效果^[2]。然而其

缺陷在于增益调节较难, 无法灵活的适应环境变化, 而且鲁棒性难以得到保障。2001 年, Tannuri Donha 和 Pesce 应用滑动模型控制 (sliding mode control, SMC) 理论进行动力定位研究, 并证明其可行性和鲁棒性^[3]。文献 [4] 提出一种滑模控制方法, 验证与 PID 相比, 其对与多数环境具有良好的特性和稳定性。文献 [5] 基于一种异步数据算法设计了扩展卡尔曼滤波器, 使水下机器人定位误差减小 20%。文献 [6] 介绍了一套包括硬件、软件和算法的水下机器人控制系统, 对水下机器人的航向和其他自由度运动分开控制, 取得不错的实验效果。文献 [7] 验证了在有效的动态补偿下, 超短基线在水下机器人动力定位中的可行性。文献 [8] 针对水下机器人推理的动态过程, 分析并采用一种模糊滑膜控制方法进行动力补偿, Lyapuno 方法证明其可在有限时间内收敛并能保证鲁棒性。其他如模糊控制、神经网络控制及其改进算法等等都已取得不错的成果。

考虑水下机器人水动力特性和环境干扰, 本文以自主研制的模态切换水下机器人 (Mode-converted ROV, MC-ROV) 为对象, 建立较为完整的 6DOF 运动模型, 采用终端滑动模型 (terminal sliding mode, TSM)、无味卡尔曼 (unscented kalman filter, UKF) 方法进行动力分配和位置计算, 使 MC-ROV 动态地保持在目标位置。

收稿日期: 2015-06-28; 修回日期: 2015-09-06。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11204109); 江苏省产学研前瞻性联合研究项目 (BY2012181); 江苏科技大学海洋装备研究院 2015 年科研项目 A 类。

作者简介: 刘慧婷 (1990-), 硕士研究生, 主要从事导航定位与水下机器人研究工作。

曾庆军 (1969-), 博士, 教授, 主要从事智能电气与系统与水下机器人研究工作。

1 动力学模型

1.1 MC-ROV 简述

MC-ROV 是开架式小型水下机器人, 航速 3 节, 重 80 kg, 具有水中浮游和爬壁两种工作模式, 可以根据工作需要进行勘察或清污作业。其模态切换功能依靠一个垂向的吸附推进器和压缩弹簧来实现: 吸附推进器为小车轮和清污滚轮提供动力, 可以沿壁爬行清污; 压缩弹簧解除爬壁模式, 此时可以浮游作业。

1.2 动力学模型

MC-ROV 在水中做 6DOF 运动, 即三轴移动和三轴旋转。为方便计算, 水下机器人运动参数定义如表 1 所示。

表 1 参数定义

运动参数			力的参数		
名称	参数	名称	参数	名称	参数
纵向位移	x	纵向移动速度	u	纵向力	X
横向位移	y	横向移动速度	v	横向力	Y
垂向位移	z	垂向移动速度	w	垂向力	Z
横滚角	φ	横倾角速度	p	横摇力矩	K
俯仰角	θ	纵倾角速度	q	俯仰力矩	M
航向角	ψ	偏航角速度	r	回转力矩	N

在静水中, 可用下述方程描述水下机器人动力学特性^[9]:

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau}$$

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{v} \quad (1)$$

其中:

$$\boldsymbol{\eta} = [x \ y \ z \ \varphi \ \theta \ \psi]^T;$$

$$\mathbf{v} = [u \ v \ w \ p \ q \ r]^T;$$

$$\mathbf{J}(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2) & 0 \\ 0 & \mathbf{J}_2(\boldsymbol{\eta}_2) \end{bmatrix}, \text{ 为转换矩阵;}$$

\mathbf{M} 为水下机器人惯性矩阵, $\mathbf{M} \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$;

$\mathbf{C}(\mathbf{v})$ 为水下机器人科氏及向心力矩阵, $\mathbf{C}(\mathbf{v}) \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$;

$\mathbf{D}(\mathbf{v})$ 是水下机器人流体阻力矩阵, $\mathbf{D}(\mathbf{v}) \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$;

$\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$ 是由重力和浮力组成的回复力矩阵, $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) \in \mathbf{R}^{6 \times 1}$;

$\boldsymbol{\tau}$ 是水下机器人推进器提供的推力, $\boldsymbol{\tau} \in \mathbf{R}^{6 \times 1}$ 。

而在实际运行时, 还要考虑周围环境干扰, 如水流、波浪等带来的影响。假设 $\boldsymbol{\xi}_d$ 为干扰力, \mathbf{v}_d 表示伴随干扰力产生的速度, 则实际动力学模型应调整为^[10]

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{C}_A(\mathbf{v}_\xi)\mathbf{v}_\xi + \mathbf{D}(\mathbf{v}_\xi)\mathbf{v}_\xi + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\xi} \quad (2)$$

其中: $\mathbf{C}(\mathbf{v}) = \mathbf{C}_{RB} + \mathbf{C}_A$, $\boldsymbol{\xi}$ 是环境干扰力, 如水流、波浪等,

$\boldsymbol{\xi} \in \mathbf{R}^{6 \times 1}$, $\mathbf{v}_\xi = \mathbf{v} - \mathbf{v}_d$, 这里假定 \mathbf{v}_d 是慢时变的, 则有 $\dot{\mathbf{v}}_d \approx 0$ 。

1.3 模型参数

水下机器人动力学模型计算涉及众多的水动力系数, 目前主要有 3 种辨识方法: 经验法、试验法和 CFD 法^[11]。由于采用 CFD 可以方便的在计算机上实现各种流场、速度场等环境下的计算, 成本低, 速度快, 因此这里基于 FLUENT 软件进行 CFD 数字模拟辨识参数。水下机器人在水中运动时, 主要考虑流体惯性类系数和粘性类系数。其中惯性类水动力系数与加速度线性相关, 用附加质量描述, 而粘性类水动力系数与速

度的一次项和二次项相关。考虑 MC-ROV 的低速运行、上下对称、开架式结构等, 同时选择机体坐标系原点位于重心, 浮心与重心基本重合, 忽略众多的耦合项和高于三阶的项, 可以大大简化水动力模型^[12]。

令 MC-ROV 重心为 $x_G = y_G = z_G = 0$, 式 (a) 中惯性矩阵为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m - X_u & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_v & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m - Z_w & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{xx} - K_p & -I_{xy} & -I_{xz} \\ 0 & 0 & 0 & -I_{yx} & I_{yy} - M_q & -I_{yz} \\ 0 & 0 & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_{zz} - N_r \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, $m = 90.63 \text{ kg}$, $X_u = -1.8$, $Y_v = -78$, $Z_w = -79$, $K_p = -0.0068$, $M_q = -4.17$, $N_r = -4.23$, $I_{xx} = 4.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $I_{yy} = 4.734 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $I_{zz} = 8.925 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $I_{xy} = -0.0001 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $I_{xz} = -0.37 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $I_{yz} = 0.0004 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。

$\mathbf{C}(\mathbf{v})$ 由科氏向心力矩阵和附加质量矩阵组成, 表示为

$$\mathbf{C}(\mathbf{v}) = \mathbf{C}_{RB} + \mathbf{C}_A = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & \mathbf{C}_{12} \\ -\mathbf{C}_{12}^T & \mathbf{C}_{22} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中,

$$\mathbf{C}_{12} = \begin{bmatrix} m(y_G q + z_G r) & -m(x_G q - w) - Z_w w \\ -m(y_G p + w) + Z_w w & m(z_G r + x_G p) \\ -m(z_G p - v) - Y_v v & -m(z_G q + u) + X_u u \\ -m(x_G r + v) + Y_v v & \\ -m(y_G r - u) - X_u u & \\ m(x_G p + y_G q) & \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_{22} = \begin{bmatrix} 0 & -I_{yz} q - I_{xz} p + I_{zz} r - N_r r \\ I_{yz} q + I_{xz} p - I_{zz} r + N_r r & 0 \\ -I_{yx} r - I_{xy} p + I_{yy} q - M_q q & I_{xz} r + I_{xy} q - I_{xx} p + K_p p \\ I_{yz} r + I_{xy} p - I_{yy} q + M_q q & \\ -I_{zx} r - I_{zy} q + I_{xx} p - K_p p & \\ 0 & \end{bmatrix}$$

阻尼力 $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ 主要由阻力一次项和二次项组成, 即

$$\mathbf{D} = -\text{diag}\{X_u + X_{u|u}|u|, Y_v + Y_{v|v}|v|, Z_w + Z_{w|w}|w|, K_p + K_{p|p}|p|, M_q + M_{q|q}|q|, N_r + N_{r|r}|r|\} \quad (5)$$

其中, 各自由度二次阻尼系数为:

$$X_{u|u} = -189 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^2, Y_{v|v} = -292.98 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^2, Z_{w|w} = -314.58 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^2,$$

$$K_{p|p} = -46 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^2, M_{q|q} = -76 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^2, N_{r|r} = -38 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^2。$$

一次阻力系数为

$$X_u = -148.18 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^2, Y_v = -785.69 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^2, Z_w = -414.09 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^2,$$

$$K_p = -79.21 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^2, M_q = -103.22 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^2, N_r = -44.41 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^2。$$

回复力矩阵 $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$ 为重力 and 浮力向量:

$$\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} (W - B) \sin\theta \\ -(W - B) \cos\theta \sin\varphi \\ -(W - B) \cos\theta \cos\varphi \\ -(y_G W - y_B B) \cos\theta \cos\varphi + (z_G W - z_B B) \cos\theta \sin\varphi \\ (z_G W - z_B B) \sin\theta + (x_G W - x_B B) \cos\theta \cos\varphi \\ -(x_G W - x_B B) \cos\theta \sin\varphi - (y_G W - y_B B) \sin\theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中: W 和 B 分别为重力和浮力, x_B 、 y_B 和 z_B 为 MC-ROV 浮心。经过调平衡, MC-ROV 的重力最后为 $W = 888.174 \text{ N}$, 浮力为 $B = 892.878 \text{ N}$, 重心和浮心之间的关系可描述为 $x_B - x_G = 0$, $y_B - y_G = 0$, $z_B - z_G = 0.1546 \text{ m}$ 。

2 定位算法分析

在对水下机器人实时控制时, 要求能够及时适应突变的运动环境, 即在受到波浪、海流等影响时迅速改变控制量。本文根据定位误差有序地进行初次动力分配, 然后利用 NTSM 对外部干扰和不确定性具有鲁棒性对推力做动态补偿。同时, 运用 UKF 滤波器估计水下机器人实时位置, 以进行下次动力分配。

2.1 非奇异终端滑模

如表 1 所示参数, 定义 $\mathbf{q} = [x \ y \ z \ \varphi \ \theta \ \psi]^T$, 与 $\boldsymbol{\eta}$ 等同, 是机器人实时的位置和姿态, 则 $\dot{\mathbf{q}}$ 表示线速度和角速度, $\ddot{\mathbf{q}}$ 表示线加速度和角加速度。令 q_d (常数) 为定位目标, 那么定位误差表示为 $\tilde{\mathbf{q}} = \mathbf{q} - q_d$ 。算法实现目标为寻找适当的控制律, 使水下机器人的位置 q 能够尽快地到达期望值 q_d , 即 $\tilde{\mathbf{q}}$ 要在有限时间内快速收敛到零^[13]。

定义运算

$$\text{sig}(\dot{\mathbf{q}})^\gamma = [|\dot{q}_1|^\gamma \text{sign}(\dot{q}_1), \dots, |\dot{q}_6|^\gamma \text{sign}(\dot{q}_6)]^T \quad (7)$$

则本算法的 NTSM 设计如下^[14]

$$\mathbf{s} = \tilde{\mathbf{q}} + \boldsymbol{\beta} \text{sig}(\dot{\mathbf{q}})^\gamma \quad (8)$$

式中, $\boldsymbol{\beta} = \text{diag}\{\beta_1, \dots, \beta_6\}$, $\beta_i > 0$, $1 < \gamma_i < 2$, $i = 1, 2, \dots, 6$ 。

MC-ROV 由某一状态趋近 q_d 时按如下规定到达

$$\dot{\mathbf{s}} = -\mathbf{k}_1 \mathbf{s} - \mathbf{k}_2 \text{sig}(\mathbf{s})^\rho \quad (9)$$

其中: k_1 、 k_2 为常数项, $\rho_i > 0$, $i = 1, 2, \dots, 6$ 。

对于动力定位系统, 控制器终端变量设计为

$$\mathbf{Ter} = \mathbf{k}_1 \mathbf{s} + \mathbf{k}_2 \text{sig}(\mathbf{s})^\rho + \boldsymbol{\beta}^{-1} \boldsymbol{\gamma}^{-1} |\dot{\tilde{\mathbf{q}}}|^{2-\gamma} \quad (10)$$

\mathbf{Ter} 具有非奇异滑膜特性, 是 $\dot{\tilde{\mathbf{q}}}$ 的函数。式中, \mathbf{k}_1 、 \mathbf{k}_2 越大, 鲁棒性越强; $\boldsymbol{\gamma}$ 越大稳态误差越小, 收敛越快; 在系统远离平衡位置时, 收敛时间主要由 $\boldsymbol{\beta}$ 决定。

在动力定位系统中, 要求水下机器人在推进器推力范围内能够快速、平稳地到达指定地点。而在靠近目标位置附近区域, 推力应该适当小, 以便进行微小调节, 确保定位精度。因此, \mathbf{Ter} 应该随着 $\tilde{\mathbf{q}}$ 的减小而减小。

2.2 无味卡尔曼

UKF, 即无味卡尔曼滤波 (unscented kalman filter, UKF) 是 20 世纪 90 年代出现的一种非线性滤波方法, 具有估计精度高、收敛速度快等优点, 而且不必对非线性函数求导,

在动力定位中具有广泛的应用^[15]。UKF 的基础是 Unscented 变换 (unscented transformation, UT), 其基本思想是用一组确定的离散采样点 (即 Sigma 点) 来近似状态变量的分布。UKF 假定状态满足高斯分布, 因此只需逼近其均值和方差^[16]。

MC-ROV 水下机器人的控制模型按式 (2) 进行, 控制过程中加入不确定环境干扰。将式 (2) 整理变换为

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta}) \mathbf{v} \\ \dot{\mathbf{v}} = \mathbf{M}^{-1} [-\mathbf{C}_{RB} \mathbf{v} - \mathbf{C}_A \mathbf{v}_\xi - \mathbf{D} \mathbf{v}_\xi - \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) + \boldsymbol{\tau}] \end{cases} \quad (11)$$

考虑 Unscented 卡尔曼滤波算法基于如下非线性离散状态空间模型:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{f}_k(\mathbf{x}_k) + \mathbf{B} \mathbf{u} + \mathbf{w}_k \\ \mathbf{y}_k = \mathbf{h}_k(\mathbf{x}_k) + \mathbf{v}_k \end{cases} \quad (12)$$

式中, $\mathbf{x}_k = [\boldsymbol{\eta} \ \mathbf{v}]^T$, $\mathbf{B} = [0_{6 \times 6} \ \mathbf{M}^{-1}]^T$, $\mathbf{u} \in \mathbf{R}^{6 \times 1}$ 是推进器推力, $\mathbf{h}_k(\mathbf{x}_k) = \mathbf{H} \mathbf{x}_k$, $\mathbf{f}_k(\mathbf{x}_k) = [\mathbf{J}(\boldsymbol{\eta}) \mathbf{v} - \mathbf{M}^{-1} \mathbf{C}_{RB} \mathbf{v} - \mathbf{M}^{-1} \mathbf{C}_A \mathbf{v}_\xi - \mathbf{M}^{-1} \mathbf{D} \mathbf{v}_\xi - \mathbf{M}^{-1} \mathbf{g}]^T$ 。

Unscented 卡尔曼滤波与基本卡尔曼滤波一样, 也是由时间更新和测量更新构成的,

按如下过程进行。

时间更新:

- 1) 构造 Sigma 点 χ_{k-1}^i
- 2) $\mathbf{x}_{k|k-1}^i = \mathbf{f}_k(\mathbf{x}_{k-1}^i)$
- 3) $\hat{\mathbf{x}}_k^- = \sum_{i=0}^{2n} \mathbf{W}_i^{(m)} \mathbf{x}_{k|k-1}^i$
- 4) $\mathbf{P}_{x,k}^- = \sum_{i=0}^{2n} \mathbf{W}_i^{(c)} [\mathbf{x}_{k|k-1}^i - \hat{\mathbf{x}}_k^-][\mathbf{x}_{k|k-1}^i - \hat{\mathbf{x}}_k^-]^T + \mathbf{Q}_k$

测量更新:

- 1) $\boldsymbol{\gamma}_{k|k-1}^i = \mathbf{h}(\mathbf{x}_{k-1}^i)$
- 2) $\hat{\mathbf{y}}_k^- = \sum_{i=0}^{2n} \mathbf{W}_i^{(m)} \boldsymbol{\gamma}_{k|k-1}^i$
- 3) $\mathbf{P}_{y,k} = \sum_{i=0}^{2n} \mathbf{W}_i^{(c)} [\boldsymbol{\gamma}_{k|k-1}^i - \hat{\mathbf{y}}_k^-][\boldsymbol{\gamma}_{k|k-1}^i - \hat{\mathbf{y}}_k^-]^T + \mathbf{R}_k$
- 4) $\mathbf{P}_{xy,k} = \sum_{i=0}^{2n} \mathbf{W}_i^{(c)} [\boldsymbol{\gamma}_{k|k-1}^i - \hat{\mathbf{y}}_k^-][\mathbf{x}_{k|k-1}^i - \hat{\mathbf{x}}_k^-]^T$
- 5) $\mathbf{K} = \mathbf{P}_{xy,k} \mathbf{P}_{y,k}^{-1}$
- 6) $\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}(\mathbf{y}_k - \hat{\mathbf{y}}_k^-)$
- 7) $\mathbf{P}_{x,k} = \mathbf{P}_{x,k}^- - \mathbf{K} \mathbf{P}_{y,k} \mathbf{K}^T$

2.3 动力分配方法

假设水下机器人的三轴直线运动误差和三轴旋转误差为 $\mathbf{e} = [e_x \ e_y \ e_z \ e_\varphi \ e_\theta \ e_\psi]^T$ 。针对误差设计推力如下

$$T = \begin{cases} n_1 \frac{e(i)}{|e_0(i)|} F_{\max} & \dot{e}(i) > 0 \\ n_1 \frac{e(i)}{|e_0(i)|} F_{\max} - n_2 e(i) \dot{e}(i) F_{\max} & \dot{e}(i) < 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中, n_1 、 n_2 为调节因子, F_{\max} 是推进器最大推力, T 是单个推进器推力, $-F_{\max} < T < F_{\max}$ 。

在 6DOF 动力定位时, 采用有序定位的方法, 即按照先定艏向, 再定位置, 最后定姿态的顺序依次完成整个定位系统。这样可以使动力分配更加条理, 避免动力分配混乱的情况。水下机器人 MC-ROV 的推进器共 5 个, 两个水平推进器和 3 个

垂向推进器。因此，在计算出单个推进器的推力后，需按下式分配推力

$$\tau_1 = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ K \\ M \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 + T_2 \\ 0 \\ T_3 + T_4 + T_5 \\ 0 \\ b(T_3 - T_5) \\ a(T_1 - T_2) \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中， T_1, T_2, T_3, T_4, T_5 分别为 5 个推进器的推力， $a = 0.253 \text{ m}$ ， $b = 0.341 \text{ m}$ 。

由 NTSM 补偿的动力为

$$\tau_2 = \mathbf{A} * \mathbf{T}er \quad (15)$$

其中： $\mathbf{A}_{6 \times 6}$ 为可调系数矩阵。

最终的动力分配策略为

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 \quad (16)$$

3 算法仿真

水下机器人在近水面航行时，主要受海流 (current) 和波浪 (wave) 影响。由于航行速度和时间有限，航行水域也较小，可以近似认为海流不变^[17]。而波浪的运动是较为复杂的随机过程，常利用 PM 谱 (pierson-moskowitz spectrum) 进行分析、计算波浪运动^[18]。

PM 谱在实际使用时难以预知，为简便起见，以纵向为例，采用如下方程简单描述波浪运动：

$$\eta(x, t) = \sum_{i=1}^n a_i \cos(k_i x - \omega_i t + \varepsilon_i) \quad (17)$$

式中， a_i 表示波浪幅值， k_i 为波数， ω_i, ε_i 为频率和初相。

其在水平和垂直方向上的速度为

$$v_{wave,x} = \dot{\eta} \cos(\text{atan}(\dot{\eta})) \quad (18)$$

$$v_{wave,y} = \dot{\eta} \sin(\text{atan}(\dot{\eta})) \quad (19)$$

首先考虑无干扰情况，假设 MC-ROV 在无限深广的静水中航行，初始位置定义为为原点，目标位置为 $(x, y, z) = (20, 20, -5)$ 。对于 TSM， $\beta = 0.4, \gamma = 1.4, k_1 = 3, k_2 = 6, \rho = 0.9$ 。对于 UKF，状态初值 $x_0 = 0_{12 \times 1}$ ，方差初值 $\mathbf{P}_0 = 1000 \mathbf{I}_{12 \times 12}$ ，系统噪声和量测噪声分别为

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 0.001 \mathbf{I}_{6 \times 6} & 0 \\ 0 & 0.03 \mathbf{I}_{6 \times 6} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.003 \mathbf{I}_{6 \times 6} & 0 \\ 0 & 0.001 \mathbf{I}_{6 \times 6} \end{bmatrix}$$

图 1~2 为静水中动力定位的位置和姿态曲线。图中， x, y, z 为纵轴、横轴和垂向上的位移， $roll, pitch, yaw$ 为横滚角、俯仰角和航向角。由图可知，水下机器人在静水中基本能够快速、平稳到达指定位置，只有俯仰角在水下机器人下潜时产生小幅度波动。

图 3 为水下机器人推力和力矩变化曲线图。

在同样的条件下，加入两次波浪干扰，一次在定位过程中 ($25 \text{ s} < t < 100 \text{ s}$)，一次在定位结束后 ($250 \text{ s} < t < 350 \text{ s}$)，得到对应的图形如图 4~6 所示。可见，在有干扰时，水下机器人位置和角度都会产生摇荡和振荡，但是在推力作用下会很快

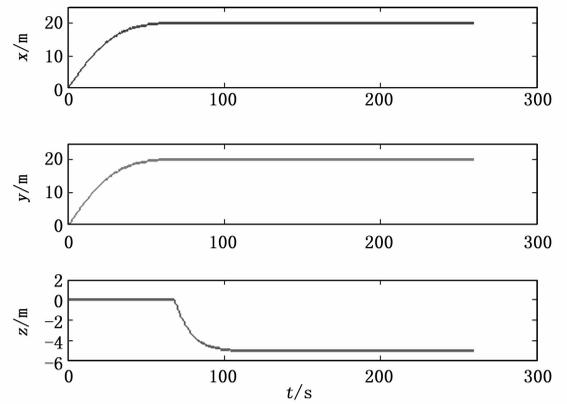


图 1 位置曲线

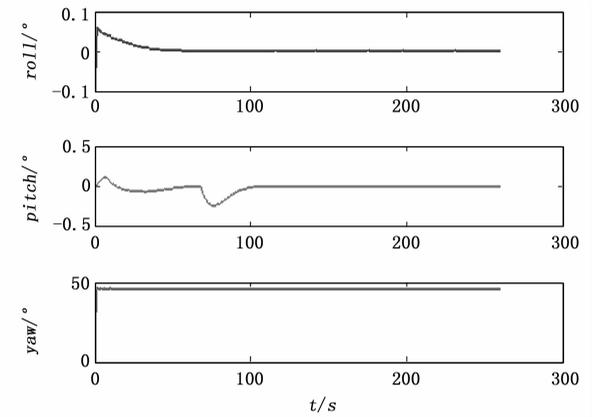


图 2 姿态曲线

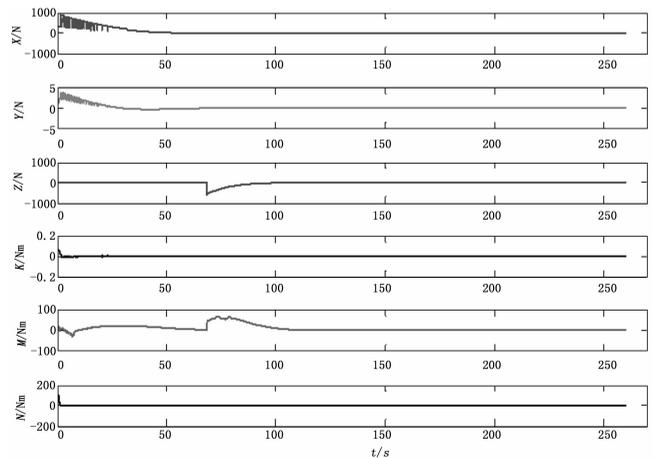


图 3 力和力矩

回到原来位置。这说明，在受到扰动时，水下机器人根据自身的实时状态，不断调整、改变推力和力矩的大小，使之趋近目标值并保持稳定。

4 结论

本文基于 NTSM 和 UKF 设计了一种水下机器人 6DOF 动力定位方法，根据定位误差分配推力，运用 NTSM 方法进行

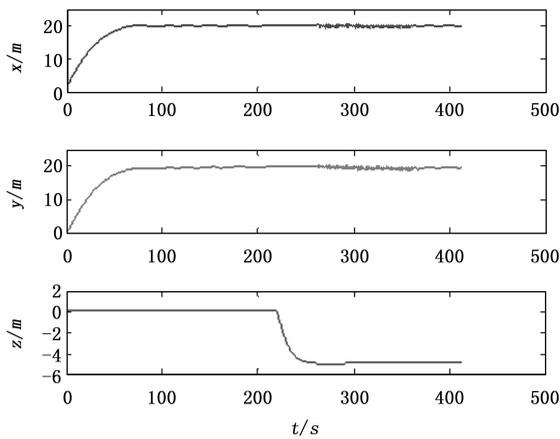


图 4 位置曲线 (扰动时)

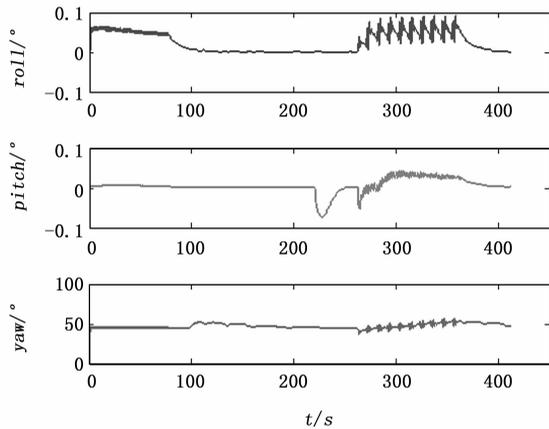


图 5 姿态曲线 (扰动时)

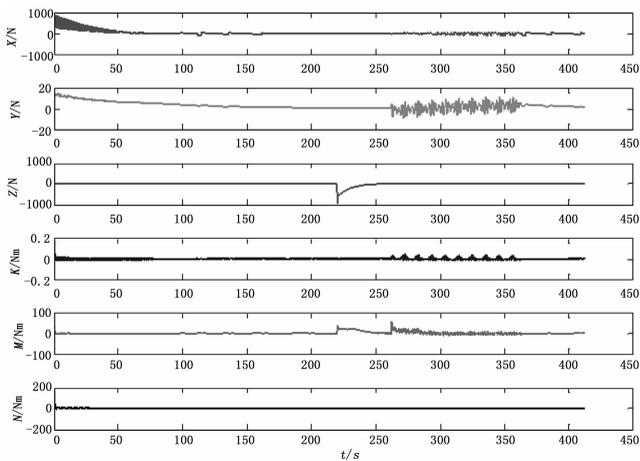


图 6 力和力矩 (扰动时)

推力补偿, 同时不断以 UKF 实时估计水下机器人的状态。从无干扰和有干扰两种环境下的仿真结果得知, 该方法能够快速、有效到达指定位置, 具有一定的抗干扰能力。该方法对其他环境干扰如海流等的抵抗能力还需进一步研究。

参考文献:

- [1] 范士波. 深海作业型 ROV 水动力试验及运动控制技术研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2013: 50.
- [2] Balchen J G, Jenssen N A, Salid S. Dynamic positioning using Kalman filtering and optimal control theory [A]. IFAC/IFIP symposium on automation in offshore oil field operation [C]. 1976, 183.
- [3] Donha D C, Tannuri E A. Non-linear semi-submersible positioning system using an H-infinity controller [A]. Proceedings of the control applications in marine systems conference (IFAC-CAMS 2001) [C]. Glasgow, Scotland, CD-ROM. 2001.
- [4] Tannuri E A, Agostinho A C, Morishita H M, et al. Dynamic positioning systems: An experimental analysis of sliding mode control [J]. Control engineering practice, 2010, 18 (10): 1121-1132.
- [5] Steinke D M, Buckham B J. A kalman filter for the navigation of remotely operated vehicles [C]. OCEANS, 2005. Proceedings of MTS/IEEE. IEEE, 2005: 581-588.
- [6] Dukan F, Ludvigsen M, Sorensen A J. Dynamic positioning system for a small size ROV with experimental results [A]. OCEANS, 2011 IEEE-Spain [C]. IEEE, 2011: 1-10.
- [7] 邢志伟, 于开洋, 王晓辉. 超短基线定位系统在 ROV 动力定位中应用的可行性研究 [J]. 机器人, 2002, 24 (6): 487-491.
- [8] Bessa W M, Dutra M S, Kreuzer E. Dynamic Positioning of Underwater Robotic Vehicles with Thruster Dynamics Compensation [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2013, 10: 1-8.
- [9] Sorensen A J. A survey of dynamic positioning control systems [J]. Annual reviews in control, 2011, 35 (1): 123-136.
- [10] Fossen T I. Marine control systems: guidance, navigation and control of ships, rigs and underwater vehicles [M]. Marine Cybernetics, 2002: 123-138.
- [11] 邓志刚, 朱大奇, 方建安. 水下机器人动力学模型参数辨识方法综述 [J]. 上海海事大学学报, 2014, 35 (2): 74-80.
- [12] Chin C S, Lau M W S, Low E, et al. Software for modelling and simulation of a remotely-operated vehicle (ROV) [J]. Professional Paper 5 (2006), 2006, 3: 114-125.
- [13] 袁雷, 肖飞, 沈建清, 等. 基于扰动观测器的不确定非线性系统非奇异终端滑模控制 [J]. 控制与决策, 2014, 29 (2): 353-357.
- [14] Yu S, Yu X, Shirinzadeh B, et al. Continuous finite-time control for robotic manipulators with terminal sliding mode [J]. Automatica, 2005, 41 (11): 1957-1964.
- [15] Cadet O. Introduction to Kalman Filter and its use in dynamic positioning systems [A]. Proceedings of Dynamic Positioning Conference [C]. 2003: 16-17.
- [16] Krishnamurthy P, Khorrami F. A self-aligning underwater navigation system based on fusion of multiple sensors including DVL and IMU [A]. Control Conference (ASCC), 2013 9th Asian [C]. IEEE, 2013: 1-6.
- [17] 曹永辉. 复杂环境下自主式水下航行器动力定位技术研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
- [18] 孙行衍, 付明玉, 施小成, 等. 基于 UKF 联邦滤波的动力定位船舶运动状态估计 [J]. 中国造船, 2013 (1): 114-128.