

基于路径参数一致的水下机器人编队与避障控制

苏震¹, 刘殿勇², 孙达智², 梁霄²

(1. 珠海云洲智能科技股份有限公司工业发展部, 广东 珠海 519080;

2. 大连海事大学船舶与海洋工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 面向大范围、自主化的水下协同作业任务, 研究了基于路径参数一致的水下机器人编队与避障控制问题。首先, 构建基于虚拟结构的机器人编队误差模型, 将路径引导下的编队控制解耦为路径跟踪控制与路径参数同步。其次, 考虑机器人与虚拟参考点之间的路径跟踪控制, 设计基于位置和速度误差反馈的个体跟踪控制律; 考虑状态信息非全局已知的路径参数同步, 设计基于路径参数一致的编队控制律; 进一步考虑障碍物约束, 利用人工势函数设计基于速度修正的避障控制律, 实现机器人编队与避障控制。仿真结果表明, 编队系统能够以期望队形跟踪给定参数化路径, 且能够对障碍物进行有效规避。

关键词: 水下机器人; 编队控制; 避障控制; 虚拟结构; 路径参数一致

中图分类号: TP24

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.202253

Path parameter consensus-based formation and obstacle avoidance control of autonomous underwater vehicles

SU Zhen¹, LIU Dianyong², SUN Dazhi², LIANG Xiao²

1. Industrial Development Department, Zhuhai Yunzhou Intelligent Technology Co., Ltd., Zhuhai 519080, China

2. Naval Architecture and Ocean Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China

Abstract: For large-scale and autonomous underwater cooperative work, the formation and obstacle avoidance control of autonomous underwater vehicle (AUV) were researched. Firstly, the formation error model was constructed using the virtual structure, which transformed the formation control guided by paths into path following control and path parameter synchronization. Then, to solve the path following control between vehicles and virtual reference points, following control laws of the individual vehicle were designed using feedback errors of positions and velocities. To solve the path parameter synchronization under knowing partial state information, formation control laws were designed using path parameter consensus. And considering the obstacle constraints, obstacle avoidance control laws based on velocity correction were employed by the aid of artificial potential function. Simulation results showed that AUVs could follow the desired parametric path with the desired formation and avoid obstacles using the proposed method.

Key words: autonomous underwater vehicle, formation control, obstacle avoidance control, virtual structure, path parameter consensus

0 引言

近年来, 自治式潜水器 (autonomous underwater vehicle, AUV) 凭借隐蔽性好、成本较低、操作便

捷等特性发展迅猛, 在资源勘探、地形测绘、情报收集、军事对抗等领域扮演重要角色^[1]。考虑到个体能力有限, 难以完成复杂任务, AUV 编队协同作业因具有容错性强、任务执行力高等优势, 受到了

收稿日期: 2022-09-16; 修回日期: 2022-11-29

通信作者: 梁霄, liangxiao@dlnu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 52271302)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 52271302)

国内外学术界和工程界的广泛关注^[2-3]。

作为 AUV 编队协同作业的热点问题之一, 编队控制的目的是使多个 AUV 朝着给定目标运动, 并保持期望的编队队形^[4]。目前, 典型的编队控制方法有领航跟随法^[5]、虚拟结构法^[6]、基于行为法^[7]、人工势场法^[8]。领航跟随法是将系统中一个或多个节点定义为领航者, 其余节点定义为跟随者, 跟随者以期望的距离或角度跟踪领航者。例如, 参考文献[9]在笛卡尔坐标系建立系统编队控制模型, 利用反步法和李雅普诺夫 (Lyapunov) 理论设计了一种可使系统按期望队形航行的编队控制器。参考文献[10]考虑了控制输入受限, 利用简化后的二阶动力学模型和饱和函数设计了跟随者饱和控制律。参考文献[11]进一步考虑了跟随者速度未知, 设计了非线性饱和观测器, 有效降低了控制信号幅值。虚拟结构法则是将整个系统视为一个刚性结构体, 通过定义各节点相对结构参考点的位置设计节点控制器。例如, 参考文献[12]将编队控制问题转化为系统与虚拟结构之间的位姿跟踪误差镇定问题, 通过改变虚拟结构的几何形状解决了目标跟踪和队形变换难题。基于行为法为所有节点规定各种行为, 如目标跟踪、队形保持、避障等, 通过执行规定的行为来实现协同运动。例如, 参考文献[13]针对水中漂浮物的抓取和运输问题, 利用软绳连接两个节点组成编队系统, 基于零空间行为法设计了目标跟踪和避碰行为。基于人工势场法的编队控制策略需要设计相应的人工势函数, 如避免节点碰撞和保持群体队形的势函数, 通过求解其负梯度得到控制律。例如, 参考文献[14]利用横截函数、光滑分段函数和人工势函数研究了编队控制和避碰问题, 使编队系统能够以期望的编队队形跟踪给定目标轨迹。上述典型的编队控制方法各有优缺点, 但采用单一控制方法都难以满足编队控制分布式、自主化和集群化的多任务需求。

为了弥补单一编队控制方法的缺陷, 适应多任务需求, 国内外部分学者将上述编队控制方法与路径跟踪和轨迹跟踪相结合, 提出了轨迹引导下的编队控制方法^[15]和路径引导下的编队控制方法^[16]。例如, 参考文献[17]针对编队系统连通性保持、避碰和目标跟踪问题, 提出一种基于非线性误差转换的协同目标跟踪控制律, 克服了以往势函数避碰的困难。参考文献[18]沿着矢量方向将目标从环中心延伸至环上一点, 提出一种环形路径引导下的编队控

制方法。参考文献[19]将路径引导下的编队控制问题解耦成路径跟踪设计和路径参数同步设计两部分, 前者引导系统跟踪期望路径, 后者实现编队队形的同步。然而, 上述研究多假设每个系统均能获得路径参数信息, 即路径参数全局已知, 没有考虑水下通信带宽约束, 因此难以用于水下通信受限的 AUV 编队协同作业。此外, 编队避障性能仍是系统能否发挥工作效能的关键, 现有路径引导下的编队控制方法中较少考虑障碍物的影响。

基于以上分析, 本文在现有编队控制方法基础上, 考虑水下通信带宽约束, 研究路径引导下基于路径参数一致的 AUV 编队与避障控制问题, 构建基于虚拟结构的编队误差模型, 将路径引导下的编队控制解耦为路径跟踪控制与路径参数同步, 进行编队与避障控制器设计, 保证各节点以期望队形安全地跟踪给定参数化路径。主要贡献有: 第一, 设计了基于路径参数一致的编队协同控制律和基于势函数速度修正的避障控制律, 引导各节点跟踪期望路径并避开障碍物; 第二, 考虑部分 AUV 不能直接获取路径状态信息, 设计了基于比例积分的一致性路径参数估计律, 克服水下通信带宽约束导致的路径参数非全局已知局限性。最后, 通过两组仿真验证了所提编队和避障控制方法的有效性。

1 问题描述

1.1 运动模型

考虑由 N 个节点构成的 AUV 编队系统, 根据参考文献[20]可知, 第 i 艘 AUV 的运动模型可写为式(1):

$$\begin{cases} \dot{\eta}_i = J(\psi_i) \dot{v}_i \\ M_i \dot{v}_i = -C_i(v_i) v_i - D_i v_i + \tau_i + d_i \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\eta_i = [x_i, y_i, \psi_i]^T$ 表示大地坐标系下节点纵向位置、横向位置与艏向角, 该大地坐标系以地球表面上一点为原点, X_E 轴指向北, Y_E 轴指向东, X_E 轴与 Y_E 轴构成的平面与地球表面相切。 $v_i = [u_i, v_i, r_i]^T$ 表示纵向速度、横向速度与转艏角速度。 $\tau_i = [\tau_{ui}, 0, \tau_{ri}]^T$ 表示控制输入, 包括纵向推力和转艏力矩。 $d_i = [d_{ui}, d_{vi}, d_{ri}]^T$ 表示遭受的环境干扰。 $M_i = \text{diag}\{m_{1i}, m_{2i}, m_{3i}\}$ 表示质量矩阵。 $D_i = \text{diag}\{d_{1i}, d_{2i}, d_{3i}\}$ 表示水动力阻尼矩阵。旋转

矩阵 $\mathbf{J}(\psi_i)$ 如式 (2) 所示, 科里奥利及向心力矩阵 $\mathbf{C}_i(\mathbf{v}_i)$ 如式 (3) 所示:

$$\mathbf{J}(\psi_i) = \begin{bmatrix} \cos \psi_i & -\sin \psi_i & 0 \\ \sin \psi_i & \cos \psi_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{C}_i(\mathbf{v}_i) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m_{2i}v_i \\ 0 & 0 & m_{1i}u_i \\ m_{2i}v_i & -m_{1i}u_i & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

1.2 编队误差模型

基于虚拟结构的 AUV 编队结构如图 1 所示, 圆点表示虚拟结构中心, 圆圈表示各节点在虚拟结构中的位置, 由各节点构成了一个刚性整体。在实现编队队形的过程中, 虚拟结构中心负责跟踪给定的参数化路径, 各节点则负责跟踪刚性结构体的参考点。其中, 参数化路径可写为 $\boldsymbol{\eta}_d = [x_d(S_i), y_d(S_i)]^\top$, S_i 表示与时间无关的路径参数, 虚拟结构中参考点的位置与角度可用相对于结构中心的距离 l_i 与角度 θ_i 来确定。

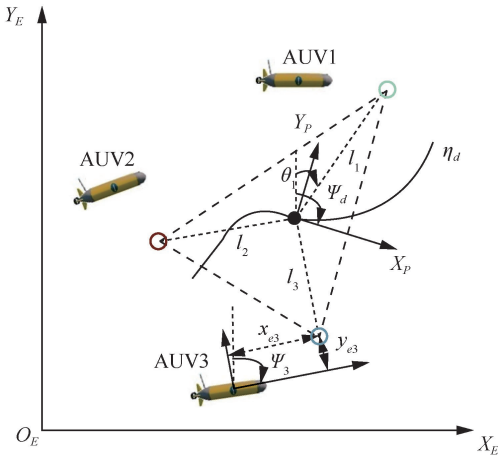


图1 基于虚拟结构的 AUV 编队结构

根据图 1 所示的几何关系, 虚拟结构中各参考点的位姿表示如式 (4) 所示:

$$\boldsymbol{\eta}_{vi} = \boldsymbol{\eta}_d + \mathbf{R}(\psi_d) \mathbf{l}_i \quad (4)$$

其中, $\boldsymbol{\eta}_{vi} = [x_{vi}, y_{vi}, \psi_{vi}]^\top$ 表示虚拟结构中任意参考点位置与艏向角。 $\mathbf{l}_i = [l_{xi}, l_{yi}, 0]^\top$ 表示结构中心到参考点的距离, 且有 $l_{xi} = l_i \cos \theta_i$, $l_{yi} = l_i \sin \theta_i$ 。 $\mathbf{R}(\psi_d)$ 表示转换矩阵, 其形式如式 (5) 所示:

$$\mathbf{R}(\psi_d) = \begin{bmatrix} \cos \psi_d(S_i) & -\sin \psi_d(S_i) & 0 \\ \sin \psi_d(S_i) & \cos \psi_d(S_i) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, $\psi_d = \text{atan2}(\dot{y}_d(S_i), \dot{x}_d(S_i))$ 。

虚拟结构中参考点位姿表示如式 (6) 所示:

$$\begin{cases} x_{vi} = x_d + l_i \cos \psi_d \cos \theta_i - l_i \sin \psi_d \sin \theta_i \\ y_{vi} = y_d + l_i \sin \psi_d \cos \theta_i + l_i \cos \psi_d \sin \theta_i \\ \psi_{vi} = \psi_d \end{cases} \quad (6)$$

计算各 AUV 与虚拟结构参考点之间的位置和角度误差, 可以得到式 (7):

$$\begin{cases} x_{ei} = (x_i - x_{vi}) \cos \psi_i + (y_i - y_{vi}) \sin \psi_i \\ y_{ei} = -(x_i - x_{vi}) \sin \psi_i + (y_i - y_{vi}) \cos \psi_i \\ \psi_{ei} = \psi_i - \psi_{vi} \end{cases} \quad (7)$$

对式 (7) 求导, 并利用式 (1) 所示运动模型, 可得编队误差模型如式 (8) 所示:

$$\begin{cases} \dot{x}_{ei} = u_i - u_{vi} \cos \psi_{ei} - v_{vi} \sin \psi_{ei} + y_{ei} r_i \\ \dot{y}_{ei} = v_i + u_{vi} \sin \psi_{ei} - v_{vi} \cos \psi_{ei} - x_{ei} r_i \\ \dot{\psi}_{ei} = r_i - r_{vi} \\ \dot{u}_i = \frac{m_{2i}}{m_{1i}} v_i r_i - \frac{d_{1i}}{m_{1i}} u_i + \frac{\tau_{ui} + d_{ui}}{m_{1i}} \\ \dot{v}_i = -\frac{m_{1i}}{m_{2i}} u_i r_i - \frac{d_{2i}}{m_{2i}} v_i + \frac{d_{vi}}{m_{2i}} \\ \dot{r}_i = \frac{m_{1i} - m_{2i}}{m_{3i}} u_i v_i - \frac{d_{3i}}{m_{3i}} r_i + \frac{\tau_{ri} + d_{ri}}{m_{3i}} \end{cases} \quad (8)$$

其中, r_{vi} 表示虚拟参考点的转艏角速度。

1.3 控制目标

路径引导下 AUV 编队与避障控制框架如图 2 所示, 包括路径跟踪控制和路径参数同步两部分。根据单条期望路径解算出编队期望路径, 利用误差反馈和路径参数一致性设计路径跟踪控制器; 同时, 考虑障碍物约束, 设计基于势函数的避障速度修正量, 以保证 AUV 以期队形安全跟踪期望路径。

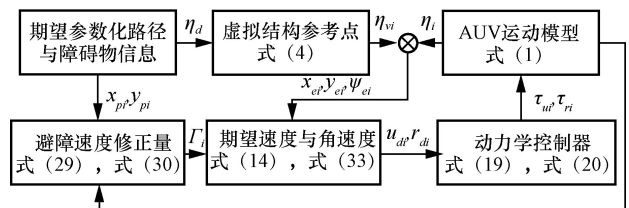


图2 路径引导下 AUV 编队与避障控制框架

本文控制目标如下。

(1) 路径跟踪控制目标。考虑给定的参数化路径 η_d ，设计 AUV 路径跟踪控制器，使其收敛到期望编队队形的期望位置，即纵向跟踪误差与横向跟踪误差收敛至 0，具体表示如式 (9) 所示：

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} \|x_{ei}\| = 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \|y_{ei}\| = 0 \end{cases} \quad (9)$$

(2) 路径参数同步目标。给定 AUV 编队参考速度 v_s ，利用路径参数一致性方法使参数 $S_i = S_j$ ，且有 $\dot{S}_i = v_s$ ，即各节点以给定的参考速度维持期望的编队队形，具体表示如式 (10) 所示：

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} \|S_i - S_j\| = 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \|\dot{S}_i - v_s\| = 0 \end{cases} \quad (10)$$

其中， $i, j = 1, 2, \dots, N$ ，且有 $i \neq j$ 。

2 编队与避障控制器

本节给出了路径引导下 AUV 编队与避障控制器，包括针对式 (9) 的路径跟踪控制设计、针对式 (10) 的路径参数同步设计以及考虑自主避障的控制设计 3 个部分。

2.1 路径跟踪控制设计

为了便于控制设计，可将式 (8) 中的误差动力学改写为式 (11)：

$$\begin{cases} \dot{x}_{ei} = u_i - U_i \cos \psi_{ei} + y_{ei} r_i \\ \dot{y}_{ei} = v_i + U_i \sin \psi_{ei} - x_{ei} r_i \end{cases} \quad (11)$$

其中， $U_i = \sqrt{\dot{x}_{vi}^2 + \dot{y}_{vi}^2}$ 表示 AUV 参考速度。

选择如式 (12) 所示的 Lyapunov 函数：

$$V_1 = \frac{1}{2}(x_{ei}^2 + y_{ei}^2) + k_1(1 - \cos \psi_{ei}) \quad (12)$$

其中， $k_1 > 0$ 。

对式 (12) 求导可得到式 (13)：

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= x_{ei} \dot{x}_{ei} + y_{ei} \dot{y}_{ei} + k_1 r_{ei} \sin \psi_{ei} = \\ &= x_{ei}(-u_i + U_i \cos \psi_{ei}) + \\ &\quad \left(k_2 \frac{\dot{x}_{vi} \ddot{y}_{vi} - \dot{y}_{vi} \ddot{x}_{vi}}{\dot{x}_{vi}^2 + \dot{y}_{vi}^2} - k_2 r_i + U_i y_{ei} \right) \sin \psi_{ei} - v_i y_{ei} \end{aligned} \quad (13)$$

将期望速度和期望角速度设计为式 (14)：

$$\begin{cases} u_{di} = U_i \cos \psi_{ei} + k_1 x_{ei} \\ r_{di} = \frac{\dot{x}_{vi} \ddot{y}_{vi} - \dot{y}_{vi} \ddot{x}_{vi}}{\dot{x}_{vi}^2 + \dot{y}_{vi}^2} + \frac{U_i y_{ei}}{k_2} + U_i k_3 \sin \psi_{ei} \end{cases} \quad (14)$$

其中， $k_2 > 0$ ， $k_3 > 0$ 。

进一步定义 AUV 速度误差和角速度误差如式 (15) 所示：

$$\begin{cases} u_{ei} = u_i - u_{di} \\ r_{ei} = r_i - r_{di} \end{cases} \quad (15)$$

对式 (15) 求导，并带入运动模型式 (1)，则有式 (16)：

$$\begin{cases} \dot{u}_{ei} = \frac{m_{2i}}{m_{1i}} v_i r_i - \frac{d_{1i}}{m_{1i}} u_i + \frac{\tau_{ui} + d_{ui}}{m_{1i}} - \dot{u}_{di} \\ \dot{r}_{ei} = \frac{m_{1i} - m_{2i}}{m_{3i}} u_i v_i - \frac{d_{3i}}{m_{3i}} r_i + \frac{\tau_{ri} + d_{ri}}{m_{3i}} - \dot{r}_{di} \end{cases} \quad (16)$$

选择式 (17) 所示的 Lyapunov 函数：

$$V_2 = \frac{1}{2} u_{ei}^2 + \frac{1}{2} r_{ei}^2 \quad (17)$$

对式 (17) 求导，并带入式 (16)，可以得到式 (18)：

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= u_{ei} \left(\frac{m_{2i}}{m_{1i}} v_i r_i - \frac{d_{1i}}{m_{1i}} u_i + \frac{\tau_{ui} + d_{ui}}{m_{1i}} - \dot{u}_{di} \right) + \\ &\quad r_{ei} \left(\frac{m_{1i} - m_{2i}}{m_{3i}} u_i v_i - \frac{d_{3i}}{m_{3i}} r_i + \frac{\tau_{ri} + d_{ri}}{m_{3i}} - \dot{r}_{di} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

将 AUV 纵向推力和转艏力矩设计为式 (19)：

$$\begin{cases} \tau_{ui} = m_{1i} \left(-\frac{m_{2i}}{m_{1i}} v_i r_i + \frac{d_{1i}}{m_{1i}} u_i - k_4 u_{ei} + \dot{u}_{di} - \hat{d}_{ui} \right) \\ \tau_{ri} = m_{3i} \left(-\frac{m_{1i} - m_{2i}}{m_{3i}} u_i v_i + \frac{d_{3i}}{m_{3i}} r_i - k_5 r_{ei} + \dot{r}_{di} - \hat{d}_{ri} \right) \end{cases} \quad (19)$$

其中， $k_4 > 0$ ， $k_5 > 0$ ， $\hat{d}_{ui}$ 和 $\hat{d}_{ri}$ 表示干扰估计值，可由参考文献[21]中的状态观测器得到，其形式如式 (20) 所示：

$$\begin{cases} \mathbf{M}_i \dot{\hat{\mathbf{v}}}_i = -\mathbf{C}_i(\mathbf{v}_i) \mathbf{v}_i - \mathbf{D}_i \mathbf{v}_i + \boldsymbol{\tau}_i + \mathbf{z}_i \\ \mathbf{z}_i = -\lambda_1 \mathbf{L}^{1/2} \|\mathbf{M}_i \hat{\mathbf{v}}_i - \mathbf{M}_i \mathbf{v}_i\|^{1/2} \text{sgn}(\hat{\mathbf{v}}_i - \mathbf{v}_i) + \hat{\mathbf{d}}_i \\ \dot{\hat{\mathbf{d}}}_i = -\lambda_2 \mathbf{L} \text{sgn}(\hat{\mathbf{d}}_i - \mathbf{z}_i) \end{cases} \quad (20)$$

其中, $\lambda_{u_i} > 0$, $\lambda_{v_i} > 0$, $L = \text{diag}\{l_{u_i}, l_{v_i}, l_{r_i}\}$, 这里 $l_{u_i} > 0$, $l_{v_i} > 0$, $l_{r_i} > 0$ 。

将式 (19) 代入式 (18), 则有式 (21):

$$\dot{V}_1 = u_{ei}\dot{u}_{ei} + r_{ei}\dot{r}_{ei} = -k_4 u_{ei}^2 - k_5 r_{ei}^2 \leq 0 \quad (21)$$

由李雅普诺夫稳定性可知, AUV 速度与角速度误差是渐近稳定的。

2.2 路径参数同步设计

在编队系统中, 每个 AUV 的动态特性可表示为式 (22):

$$\dot{\mathbf{x}}_i(t) = \mathbf{u}_i(t), \quad i \in P \quad (22)$$

其中, $\mathbf{x}_i(t) = [x_i(t), y_i(t), \psi_i(t)]^\top$ 表示 t 时刻第 i 个节点对应的结构参考点位置与艏向角, $\mathbf{u}_i(t)$ 表示控制输入, $P = \{1, 2, \dots, N\}$ 表示 AUV 集合。

针对式 (22), 设计控制输入为式 (23):

$$\mathbf{u}_i(t) = \sum_{j \in J_i} a_{ij} (\mathbf{x}_j(t) - \mathbf{x}_i(t)) \quad (23)$$

其中, J_i 表示与第 i 个 AUV 存在信息交互的相邻成员集合, $a_{ij} > 0$ 表示邻接矩阵中的第 i 行第 j 列元素。

基于相邻 AUV 路径参数的同步误差如式 (24) 所示:

$$e_i = \sum_{j=1}^N a_{ij} (S_1 - S_j) \quad (24)$$

考虑到水下通信受限导致部分 AUV 不能直接获取路径参数信息, 设计基于比例积分的一致性路径参数估计律如式 (25):

$$\begin{cases} \dot{S}_1 = v_s - \sum_{j \in J_i} a(S_1 - S_j) \\ \dot{S}_i = -\sum_{j \in J_i} a(S_i - S_j) + \varsigma_i \end{cases} \quad (25)$$

且有式 (26):

$$\dot{\varsigma}_i = -\sum_{j \in J_i} c(S_i - S_j) \quad (26)$$

其中, $a > 0$, $c > 0$ 。

根据式 (25) 可知, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, 有 $S_1 = S_2 = \dots = S_N$, 且有 $\dot{S}_1 = \dot{S}_2 = \dots = \dot{S}_N = v_s$, 即各 AUV 路径参数同步。

2.3 自主避障控制设计

采用人工势函数调整各 AUV 参考路径, 生成

无碰撞的参考路径来规避障碍物。人工势函数可表示为式 (27):

$$\Gamma_i = \begin{cases} \left(\frac{d_i^2 - R_i^2}{d_i^2 - r_i^2} \right)^2, & r_i < d_i \leq R_i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (27)$$

其中, R_i 表示障碍物可探测区域半径, 即 AUV 进入该区域范围内即可探测到障碍物。 r_i 表示膨胀化后的障碍物半径, $d_i = \sqrt{(x_i - x_{pi})^2 + (y_i - y_{pi})^2}$ 表示第 i 个 AUV 与障碍物之间的距离, $[x_{pi}, y_{pi}]^\top$ 表示障碍物位置。

编队系统在跟踪期望路径的同时需避免与障碍物的碰撞, 则有式 (28):

$$\|\boldsymbol{\eta}_i(S_i) - \boldsymbol{\eta}_j(S_j)\| - (r_i + r_j) \geq \varepsilon \quad (28)$$

其中, $\varepsilon > 0$ 。

考虑式 (27) 所示势函数, 各节点受到的斥力在纵向上的偏导数如式 (29) 所示:

$$(\Gamma_i)_x = \begin{cases} \frac{4(R_i^2 - r_i^2)(d_i^2 - R_i^2)}{(d_i^2 - r_i^2)^3} (x_i - x_{pi}), & r_i < d_i \leq R_i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (29)$$

在横向上的偏导数如式 (30) 所示:

$$(\Gamma_i)_y = \begin{cases} \frac{4(R_i^2 - r_i^2)(d_i^2 - R_i^2)}{(d_i^2 - r_i^2)^3} (y_i - y_{pi}), & r_i < d_i \leq R_i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (30)$$

结合式 (29) 和式 (30), 虚拟力向量表示如式 (31) 所示:

$$\mathbf{f}_{pi} = -k_{pi} [(\Gamma_i)_x, (\Gamma_i)_y]^\top \quad (31)$$

其中, $k_{pi} > 0$ 。运动坐标系下避障修正量如式 (32) 所示:

$$\begin{cases} u_{bi} = k_{pi} k_{bu} ((\Gamma_i)_x \cos \psi_i + (\Gamma_i)_y \sin \psi_i) \\ r_{bi} = k_{pi} k_{br} (-(\Gamma_i)_x \sin \psi_i + (\Gamma_i)_y \cos \psi_i) \end{cases} \quad (32)$$

其中, $k_{bu} > 0$, $k_{br} > 0$ 。

考虑障碍物约束下的编队控制, 基于速度修正的避障控制律可表示为式 (33):

$$\begin{cases} u_{di} = U_i \cos \psi_e + k_1 x_{ei} + k_{pi} k_{bu} ((\Gamma_i)_x \cos \psi_i + (\Gamma_i)_y \sin \psi_i) \\ r_{di} = \frac{\dot{x}_{vi} \ddot{y}_{vi} - \dot{y}_{vi} \ddot{x}_{vi}}{\dot{x}_{vi}^2 + \dot{y}_{vi}^2} + \frac{U_i y_{ei}}{k_2} + U_i k_3 \sin \psi_e + \\ k_{pi} k_{br} (-(\Gamma_i)_x \sin \psi_i + (\Gamma_i)_y \cos \psi_i) \end{cases} \quad (33)$$

同时, 针对 AUV 在避障时可能陷入局部极小值的问题, 引入虚拟逃逸力帮助 AUV 逃离局部极小值点。具体方法为: 垂直于 AUV 与障碍物的连线, 随机选取一个虚拟目标点, 使 AUV 受到一个逃逸力, 使其所受合力不为 0 而跳出局部最优解, 保证编队系统安全跟踪期望路径。

选取虚拟目标点 $[x_{ii}, y_{ii}]^T$, 其位置关系满足式 (34):

$$y_{ii} - y_i = -\frac{x_i - x_{pi}}{y_i - y_{pi}}(x_{ii} - x_i) \quad (34)$$

虚拟逃逸力大小可表示为式 (35):

$$f_i = k_{fi} d_{fi} \quad (35)$$

其中, $k_{fi} > 0$, $d_{fi} = \sqrt{(x_i - x_{ii})^2 + (y_i - y_{ii})^2}$ 表示 AUV 与逃逸目标点之间的距离。

3 仿真验证

为了验证所提控制方法的有效性, 选取参考文献[22]中的 AUV 模型进行仿真研究。下面给出 3 艘 AUV 编队与避障控制的仿真结果, 包括路径引导下编队控制和编队与避障控制。

仿真 1: 路径引导下编队控制。

期望的参数化路径为 $x_d = 50 \cos(S_i)$, $y_d = 50 \sin(S_i)$ 。针对期望的编队队形, AUV 与虚拟结构中心的偏移量及偏移角度为 $[l_{x1}, l_{y1}, \theta_1]^T = [0, 0, 0]^T$, $[l_{x2}, l_{y2}, \theta_2]^T = [-10, 10, -\pi/4]^T$, $[l_{x3}, l_{y3}, \theta_3]^T = [-10, -10, \pi/4]^T$ 。

各 AUV 初始速度为 $u_i(0) = 0$, $v_i(0) = 0$, $r_i(0) = 0$, 这里 $i = 1, 2, 3$ 。各 AUV 初始位置和艏向角为 $[x_1(0), y_1(0), \psi_1(0)]^T = [0, -50, 0]^T$, $[x_2(0), y_2(0), \psi_2(0)]^T = [-30, -20, -\pi/4]^T$, $[x_3(0), y_3(0), \psi_3(0)]^T = [-40, -80, \pi/3]^T$ 。

控制参数 $v_s = 1$, $a = 0.1$, $c = 0.01$, $k_1 = 0.1$, $k_2 = 1.4$, $k_3 = 6$, $k_4 = 3$, $k_5 = 1$, $k_{pi} = 1$, $k_{fi} = 20$, $k_{bu} = k_{br} = 2$, $\lambda_{1i} = 0.2$, $\lambda_{2i} = 0.01$, $L = \text{diag}\{200, 200, 200\}$ 。

路径引导下编队控制仿真结果如图 3~图 7 所示。图 3 给出了路径引导下编队控制行为, 其中分别标记了各节点在不同时刻下的位置, 可以看出, AUV 从给定初始位置出发后按期望的三角编队队形跟踪期望路径。图 4 给出了 AUV 路径参数曲线, 可以看出各 AUV 路径参数经过短暂调整后逐渐趋于一致, 即路径参数同步误差趋于 0, 从而验证了所提一致性路径参数估计的有效性。图 5 给出了各 AUV 纵向位置误差和横向位置误差, 可以看出, 该位置误差逐渐收敛到 0。图 6 给出了 AUV 纵向速度和角速度曲线, 其中的初始阶段速度较大是由节点距离期望位置较远造成的。图 7 给出了 AUV 控制输入曲线, 包括纵向推力与转舵力矩, 在初始较大的控制输入下生成较大的速度, 使 AUV 以期望速度跟踪期望路径。

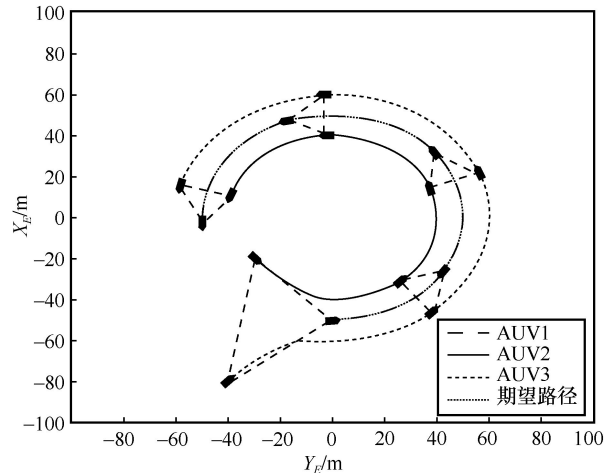


图 3 路径引导下编队控制行为

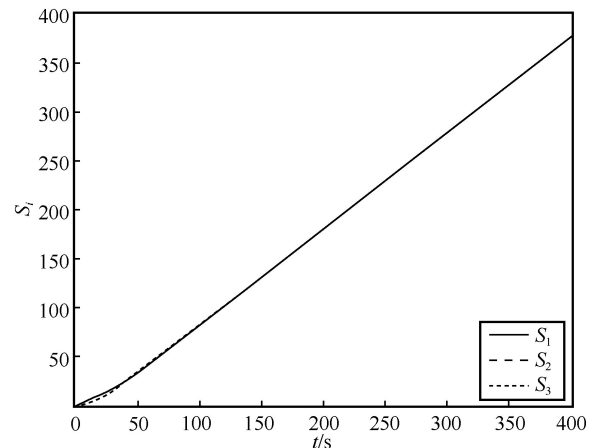


图 4 AUV 路径参数

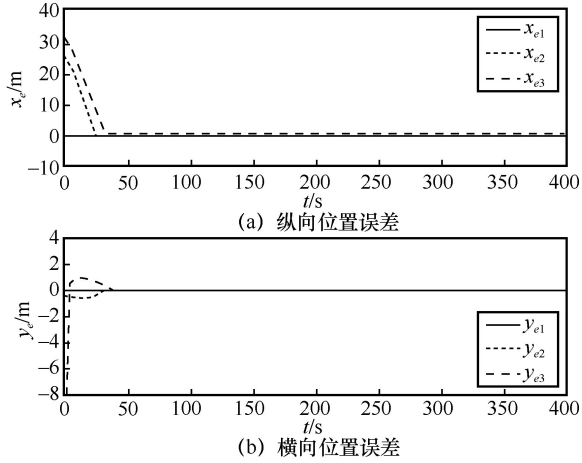


图5 AUV 路径跟踪误差

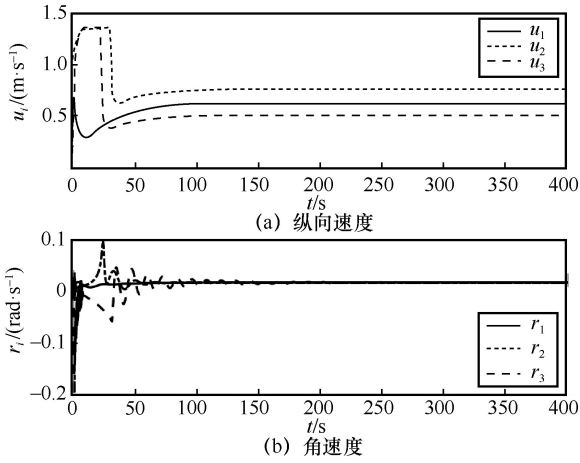


图6 AUV 纵向速度与角速度

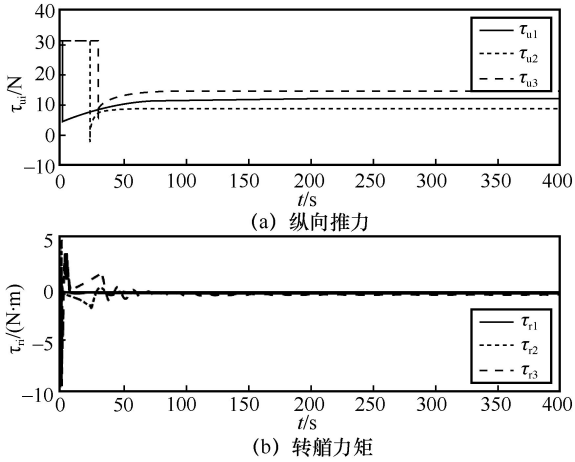


图7 AUV 控制输入

仿真 2: 编队与避障控制。

在基于路径引导的编队控制过程中考虑 AUV 避障问题, 两个膨胀化的障碍物位置分别为 $[x_{p1}, y_{p2}]^T = [30, 45]^T$ 和 $[x_{p1}, y_{p2}]^T = [200, 150]^T$, 其半径分别为 12 和 8。此外, 考虑编队队形变换问题, 在前 200 s 内, 偏移量及偏移角度设为

$[l_{x1}, l_{y1}, \theta_1]^T = [0, 0, 0]^T$, $[l_{x2}, l_{y2}, \theta_2]^T = [-20, 20, -\pi/4]^T$, $[l_{x3}, l_{y3}, \theta_3]^T = [-20, -20, \pi/4]^T$; 在后 200 s 内, 偏移量及偏移角度设为 $[l_{x1}, l_{y1}, \theta_1]^T = [0, 0, 0]^T$, $[l_{x2}, l_{y2}, \theta_2]^T = [-20, 20, 0]^T$, $[l_{x3}, l_{y3}, \theta_3]^T = [-20, -20, 0]^T$ 。

编队与避障控制仿真结果如图 8~图 11 所示。图 8 给出了障碍约束下编队与避障控制行为, 可以看出, AUV 能够按期望的编队队形安全地跟踪期望路径, 且能够在 200 s 时进行编队队形变换, 即由给定的三角形变换为一字形。图 9 给出了障碍约束下 AUV 路径参数曲线, 各路径参数经过短暂调整后逐渐趋于一致。图 10 给出了 AUV 与虚拟参考点的位置误差, 可以看出, 跟踪误差能够较快地收敛到 0, 其中的误差不为 0 是由规避障碍物导致的, 当绕过障碍物后跟踪误差又较快收敛到 0。图 11 给出了障碍约束下纵向速度与角速度曲线, 可以看出, 各节点在规避障碍物时需调整自身的速度和角度, 绕过障碍物后趋于稳定。

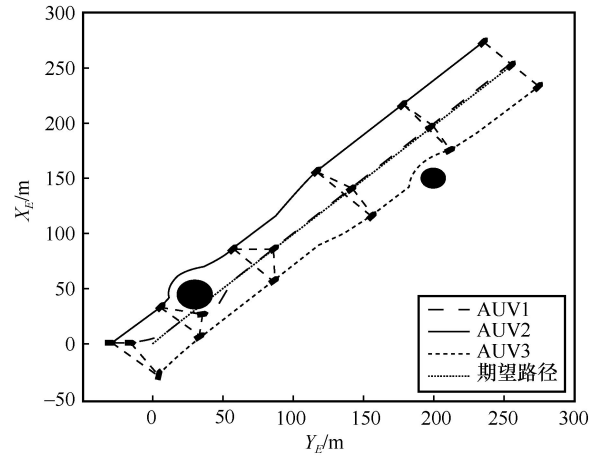


图8 障碍约束下编队与避障控制行为

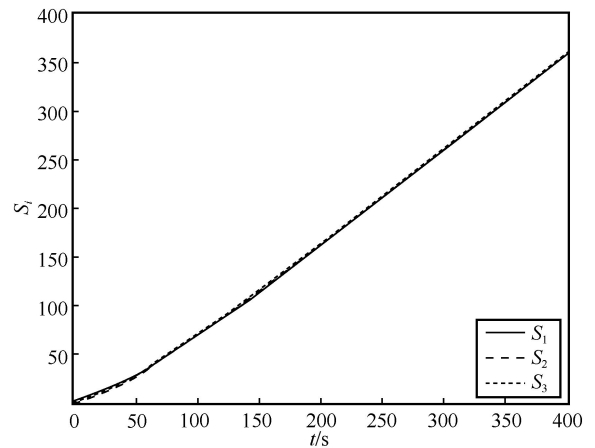


图9 障碍约束下 AUV 路径参数

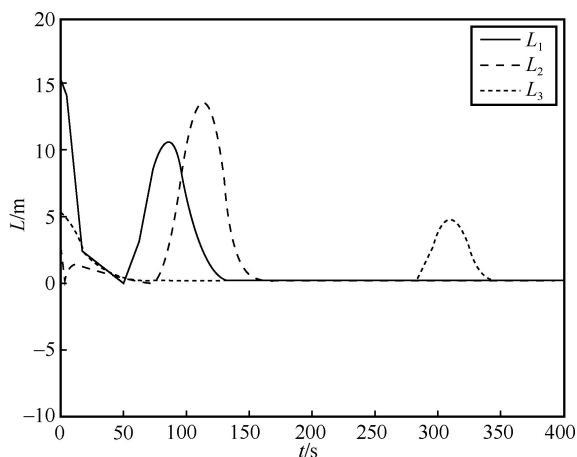


图10 AUV与虚拟参考点的位置误差

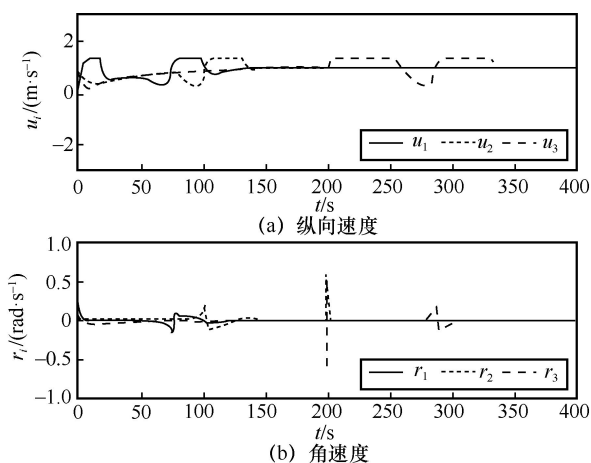


图11 障碍约束下AUV纵向速度与角速度

4 结束语

本文考虑水下状态信息非全局已知及障碍物约束,研究了路径引导下基于路径参数一致的AUV编队与避障控制方法。首先,利用虚拟结构法设计了期望编队结构,根据虚拟结构得到各AUV期望参考点,并将路径引导下编队控制解耦为路径跟踪控制与路径参数同步。然后,利用误差反馈、一致性理论设计基于路径引导的编队控制器,并设计了路径参数非全局已知下的一致性路径参数估计律。进一步考虑障碍物约束,设计基于人工势函数的速度修正量,用来实时调整AUV控制输入。最后,通过编队与避障控制仿真验证了所提控制器的有效性。

参考文献:

- [1] LIANG X, QU X R, WANG N, et al. Three-dimensional trajectory tracking of an underactuated AUV based on fuzzy dynamic surface control[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2020, 14(5): 364-370.
- [2] 张伟, 王乃新, 魏世琳, 等. 水下无人潜航器集群发展现状 & 关键

技术综述[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(2): 289-297.

ZHANG W, WANG N X, WEI S L, et al. Overview of unmanned underwater vehicle swarm development status and key technologies[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41(2): 289-297.

- [3] DAS B, SUBUDHI B, PATI B B. Cooperative formation control of autonomous underwater vehicles: an overview[J]. International Journal of Automation and Computing, 2016, 13(3): 199-225.
- [4] PENG Z H, WANG J, WANG D, et al. An overview of recent advances in coordinated control of multiple autonomous surface vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(2): 732-745.
- [5] YAN Z P, XU D, CHEN T, et al. Leader-follower formation control of UUVs with model uncertainties, current disturbances, and unstable communication[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2018, 18(2).
- [6] GHOMMAM J, SAAD M. Backstepping-based cooperative and adaptive tracking control design for a group of underactuated AUVs in horizontal plan[J]. International Journal of Control, 2014, 87(5): 1076-1093.
- [7] LEE G, CHWA D. Decentralized behavior-based formation control of multiple robots considering obstacle avoidance[J]. Intelligent Service Robotics, 2018, 11: 127-138.
- [8] LIU Y C, CHOPRA N. Control of semi-autonomous teleoperation system with time delays[J]. Automatica, 2013, 49(6): 1553-1565.
- [9] 丁磊, 郭戈. 一种船队编队控制的 backstepping 方法[J]. 控制与决策, 2012, 27(2): 299-303.
- [10] DING L, GUO G. Formation control for ship fleet based on backstepping[J]. Control and Decision, 2012, 27(2): 299-303.
- [11] SHOJAEI K. Leader-follower formation control of underactuated autonomous marine surface vehicles with limited torque[J]. Ocean Engineering, 2015, 105: 196-205.
- [12] SHOJAEI K. Observer-based neural adaptive formation control of autonomous surface vessels with limited torque[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2016, 78: 83-96.
- [13] 胡建章, 唐国元, 王建军, 等. 基于自适应反步滑模的水面无人艇集群控制[J]. 中国舰船研究, 2019, 14(6): 1-7.
- [14] HU J Z, TANG G Y, WANG J J, et al. Swarm control of USVs based on adaptive backstepping combined with sliding mode[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2019, 14(6): 1-7.
- [15] ARRICHIELLO F, HEIDARSSON H K, CHIAVERINI S, et al. Cooperative caging and transport using autonomous aquatic surface vehicles[J]. Intelligent Service Robotics, 2012, 5(1): 73-87.
- [16] DO K D. Practical formation control of multiple underactuated ships with limited sensing ranges[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2011, 59(6): 457-471.
- [17] PARK B S, YOO S J. Adaptive-observer-based formation tracking of networked uncertain underactuated surface vessels with connectivity preservation and collision avoidance[J]. Journal of the Franklin Institute, 2019, 356(15): 7947-7966.
- [18] LIANG X, QU X R, WANG N, et al. Swarm control with collision avoidance for multiple underactuated surface vehicles[J]. Ocean Engineering, 2019, 191: 106516.
- [19] PARK B S, YOO S J. An error transformation approach for connectivity-preserving and collision-avoiding formation tracking of networked uncertain underactuated surface vessels[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2019, 49(8): 2955-2966.

- [18] CHEN Y Y, TIAN Y P. A curve extension design for coordinated path following control of unicycles along given convex loops[J]. International Journal of Control, 2011, 84(10): 1729-1745.
- [19] QU X R, LIANG X, HOU Y H, et al. Fuzzy state observer-based cooperative path-following control of autonomous underwater vehicles with unknown dynamics and ocean disturbances[J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2021, 23(6): 1849-1859.
- [20] FOSSEN T. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2011.
- [21] LIANG X, QU X R, HOU Y H, et al. Finite-time unknown observer based coordinated path-following control of unmanned underwater vehicles[J]. Journal of the Franklin Institute, 2021, 358(5): 2703-2721.
- [22] QU X R, L X, HOU Y H, et al. Finite-time sideslip observer-based synchronized path-following control of multiple unmanned underwater vehicles[J]. Ocean Engineering, 2020, 217: 107941.

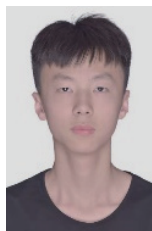
[作者简介]



苏震（1975—），男，珠海云洲智能科技股份有限公司工业发展部工程师，主要研究方向为无人集群控制与决策。



刘殿勇（1987—），男，大连海事大学船舶与海洋工程学院讲师、硕士生导师，主要研究方向为无人艇运动控制。



孙达智（2001—），男，大连海事大学船舶与海洋工程学院硕士生，主要研究方向为无人艇集群决策与控制。



梁霄（1980—），男，博士，大连海事大学船舶与海洋工程学院教授、博士生导师，主要研究方向为海上无人系统群智协同技术。