

信息受限条件下多自主水下航行器三维运动目标围捕控制方法

施琳琳 吴浩铭 吕思敏 韦标 李君 陈瑜

(华南农业大学工程学院, 广州 510642)

摘要: 针对水下环境中自主水下航行器 (Autonomous underwater vehicle, AUV) 无法获取绝对位置信息以及部分 AUV 因感知受限难以持续获取目标信息的问题, 本文提出一种信息受限条件下多 AUV 三维运动目标球状围捕控制方法, 以实现目标的近距离全方位监测。首先, 基于有向环通信拓扑设计分布式目标相对位置-速度估计器, 使目标不可见 AUV 通过局部信息交互获得目标状态估计; 其次, 以目标运动方向为虚拟围捕旋转轴构建辅助系统, 建立多 AUV 三维球状围捕队形; 在此基础上, 设计基于局部相对位置信息的围捕运动学控制器, 并结合 AUV 动力学模型设计速度跟踪控制器。理论分析证明, 在理想条件下局部跟踪误差指数收敛, 考虑目标运动扰动和状态估计误差时, 闭环系统误差最终有界。仿真结果表明, 在目标信息完全可得和部分缺失 2 种情况下, 多 AUV 均能够形成稳定的三维球状围捕队形, 当目标信息部分缺失时, 相对位置-速度估计误差可快速收敛至零附近, 围捕半径和分离角均趋近于期望值。研究结果表明, 所提方法能够在缺乏绝对位置信息和目标信息不完全可得条件下实现三维运动目标稳定围捕, 为复杂水下环境中的多 AUV 协同目标监测提供了有效解决方案。

关键词: 自主水下航行器; 三维目标围捕; 分布式控制; 信息受限; 目标状态估计

中图分类号: TP242

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)19-0081-14

OSID:



Three-dimensional Encirclement Control of Multiple AUVs for Moving Target under Limited Information

Shi Linlin Wu Haoming Lü Simin Wei Biao Li Jun Chen Yu

(College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: The three-dimensional encirclement control problem of a moving target was investigated by multiple autonomous underwater vehicles (AUVs) under limited information conditions, where absolute position information was unavailable and some AUVs cannot continuously obtain target measurements due to sensing constraints. To achieve close-range omnidirectional monitoring of the target, a distributed relative position-velocity estimator was firstly developed over a directed ring communication topology, enabling AUVs without direct target observations to estimate the target state through local information exchange. Subsequently, a virtual auxiliary system was constructed by taking the target motion direction as the virtual encirclement axis, thereby generating a three-dimensional spherical encirclement formation. Based on the estimated relative states, a kinematic encirclement controller using only local relative position information was designed, and a velocity tracking controller was further developed by incorporating the AUV dynamic model. Stability analysis showed that the local tracking errors converged exponentially under ideal conditions, while the closed-loop system remained ultimately bounded in the presence of target motion disturbances and estimation errors. Simulation results demonstrated that the proposed method enabled multiple AUVs to form and maintain a stable three-dimensional spherical encirclement formation under both complete and partial target information scenarios. Moreover, when target information was partially unavailable, the relative position-velocity estimation errors rapidly converged to a neighborhood of zero, and both the encirclement radius and separation angles approached

收稿日期: 2026-06-08 修回日期: 2026-06-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(62303188)和广东省自然科学基金项目(2024A1515010135)

作者简介: 施琳琳(1994—), 女, 讲师, 博士, 主要从事多水下机器人协同控制研究, E-mail: lynnsli@scau.edu.cn

通信作者: 陈瑜(1981—), 女, 副教授, 博士, 主要从事机器人定位导航与控制研究, E-mail: chenyu219@scau.edu.cn

their desired values. The proposed framework provided an effective solution for three-dimensional moving-target encirclement under limited information conditions, featuring an integrated design of distributed target-state estimation and spherical encirclement control without relying on absolute position information.

Key words: autonomous underwater vehicle (AUV); three-dimensional target encirclement; distributed control; limited information; target state estimation

0 引言

随着海洋牧场、水下资源调查和水下设施巡检等任务需求增加,自主水下航行器(Autonomous underwater vehicle,AUV)逐渐成为渔业资源评估和水下环境感知的重要装备^[1]。相比单 AUV,多 AUV 系统具有空间分布性、系统冗余性和协同观测优势,能够通过多平台协同提高大范围水下任务的感知覆盖能力、任务执行效率和系统鲁棒性^[2-3]。然而,水下 GPS 不可用、水声通信带宽受限、传感器探测距离有限等因素,使得多 AUV 在执行运动目标围捕任务时难以持续获得完整、准确的全局状态信息^[2-4]。因此,研究信息受限条件下多 AUV 分布式目标围捕控制方法,对提高水下装备在弱通信、弱感知环境中的协同监测、目标跟踪和自主作业能力具有重要现实意义。

围绕无人系统的协同控制问题,国内外学者已在编队控制、路径跟踪、协同搜索和目标围捕等方面开展了大量研究^[2-3,5-6]。现有多智能体协同控制方法主要包括领航者-跟随者、虚拟结构、人工势场、一致性控制等^[7-8],近年来,事件触发控制、有限时间协同控制和鲁棒自适应控制等方法也被用于提升系统在通信受限、模型不确定和外部扰动条件下的协同能力^[9-11]。目标围捕控制作为多 AUV 协同控制的重要任务,不仅要求多个 AUV 完成对目标的跟踪,还要求其在目标周围形成指定半径、角间隔或空间覆盖队形^[12-13]。已有研究在二维平面内考虑了对目标协同围捕控制^[14-15],部分工作进一步考虑了无全局坐标系、无共同参考方向和局部相对测量条件下的分布式围捕^[16]。但是,现有方法多数仍以固定目标为主,难以直接满足水下移动目标围捕的需求。

相对于固定目标围捕,运动目标围捕具有更高控制难度。已有运动目标围捕研究表明,目标运动状态会显著增加多智能体围捕构型保持和协同跟踪的复杂性^[17-18]。一方面,目标速度会作为持续时变项进入 AUV 相对运动误差系统,当目标在三维空间中持续运动时,若直接沿用固定目标围捕控制律,容易产生跟踪滞后和稳态误差;另一方面,受水下遮挡、探测距离限制或传感器观测受限等因素影响,部

分 AUV 可能无法直接获得目标相对位置^[3,16,19-20],在部分目标信息或系统状态不可直接获得的情况下,分布式状态估计为局部信息条件下的协同控制提供了重要思路^[21-22]。近年来,针对未知速度运动目标围捕,部分研究利用带噪距离或方位测量开展目标状态估计、分布式定位与目标包围控制^[23-25]。

现有围捕控制方法大多聚焦于二维平面并依赖持续目标观测,但在海洋牧场鱼群监测与驱离、水下设施周边异常目标巡检、海底管线或网箱区域移动目标跟踪等任务中,目标可能同时沿水平方向和深度方向运动,具有明显的三维空间分布特征^[1,3]。若仅在二维平面内形成环绕队形,AUV 只能从某一深度层面对目标进行观测,容易产生垂向覆盖不足和局部观测盲区,难以满足对运动目标的全方位感知。此外,AUV 难以获得全局坐标系下的绝对位置信息情况下,基于全局位置的传统控制方法难以直接应用^[3,16];同时,部分 AUV 受传感器探测距离和遮挡等因素制约无法直接观测目标^[19-20]。因此,如何在不依赖全局信息、且不要求所有 AUV 持续观测目标的条件下,实现三维运动目标的稳定跟踪与协同围捕,是提升多 AUV 在复杂水下环境适应能力的

的关键问题。

针对上述问题,本文面向信息受限条件下的多 AUV 三维运动目标围捕任务,提出一种基于分布式目标状态估计与虚拟辅助系统的协同围捕控制方法。首先,针对部分 AUV 无法直接获取目标信息的情况,提出基于有向环通信拓扑的目标相对位置-速度估计器,利用邻居间信息交互和局部坐标变换,实现目标状态的分布式估计;其次,针对三维运动目标的动态特性,设计以目标运动方向为旋转轴的虚拟辅助系统,通过运动方向自适应生成三维球状围捕参考轨迹,实现对目标全方位覆盖监测;最后,针对 AUV 在水下绝对位置信息缺失问题,设计基于相对位置的运动学-动力学级联围捕控制器,并在理想条件下证明局部跟踪误差指数收敛,同时考虑目标运动扰动和估计误差时,闭环系统具有一致最终有界性。

1 问题描述

考虑到 AUV 在水下无法获得绝对位置信息,以

及由于传感器灵敏度或障碍物遮挡等原因导致目标信息丢失的情况,本文重点考虑了信息受限条件下三维运动目标围捕控制研究,旨在通过多 AUV 的球状环绕运动,实现对目标的近距离全方位监测。

本文由 N 个 AUV 执行对运动目标 T 的分布式围捕任务,其中第 i 个 AUV 记为 $V_i, i \in N, N \triangleq \{1, 2, \dots, N\}$ 表示所有 AUV 的索引集合。与传统目标围捕不同,本文在信息受限条件下考虑的多 AUV 初始分布在三维空间中的不同位置,且不要求各 AUV 与目标处于同一深度平面。

1.1 自主水下航行器的数学模型

利用惯性坐标系和本体坐标系描述由 N 个欠驱动 AUV 组成的系统,如图 1 所示,其中 V_i 的运动学模型为

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i \cos \psi_i \cos \theta_i \\ \dot{y}_i = v_i \cos \psi_i \sin \theta_i \\ \dot{z}_i = v_i \sin \psi_i \\ \dot{\theta}_i = \omega_i \\ \dot{\psi}_i = \mu_i \end{cases} \quad (1)$$

式中 x_i ——惯性坐标系下 AUV 的横坐标
 y_i ——惯性坐标系下 AUV 的纵坐标
 z_i ——惯性坐标系下 AUV 的竖坐标
 θ_i ——惯性坐标系下 AUV 的航向角
 ψ_i ——惯性坐标系下 AUV 的俯仰角
 v_i ——AUV 前进速度
 ω_i ——AUV 偏航角速度
 μ_i ——AUV 俯仰角速度

$[v_i \ \omega_i \ \mu_i]^T$ 为 V_i 运动学模型的控制输入。本文考虑的航行器在侧向方向未安装独立的推进器,因此 V_i 无法做侧向运动。

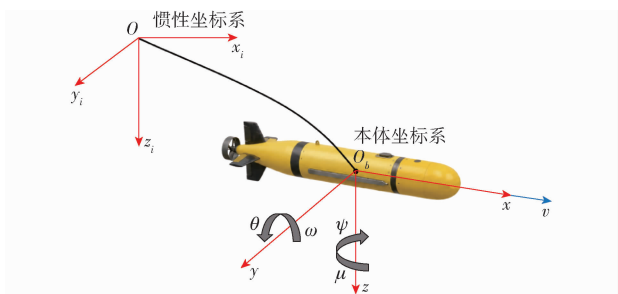


图 1 自主水下航行器运动学模型

Fig. 1 Kinematic model of AUV

基于 Fossen 海洋航行器的数学模型^[26],并在此基础上考虑无侧向推进器时,每个 V_i 的动力学模型为

$$\begin{cases} m_{v_i} \dot{v}_i + d_{v_i} = F_i \\ m_{\omega_i} \dot{\omega}_i + d_{\omega_i} = \Gamma_i \\ m_{\mu_i} \dot{\mu}_i + d_{\mu_i} = M_i \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} m_{v_i} = m_i - X_{\dot{v}_i} \\ m_{\omega_i} = I_{z_i} - N_{\dot{\omega}_i} \\ m_{\mu_i} = I_{y_i} - M_{\dot{\mu}_i} \\ d_{v_i} = D_{v_i} v_i + D_{vv_i} |v_i| v_i \\ d_{\omega_i} = D_{\omega_i} \omega_i + D_{\omega\omega_i} |\omega_i| \omega_i \\ d_{\mu_i} = D_{\mu_i} \mu_i + D_{\mu\mu_i} |\mu_i| \mu_i \end{cases} \quad (3)$$

式中 m_i ——AUV 质量

I_{z_i} ——AUV 偏航方向转动惯量

I_{y_i} ——AUV 俯仰方向转动惯量

$X_{\dot{v}_i}$ ——AUV 前进方向附加质量

$N_{\dot{\omega}_i}$ ——AUV 偏航方向附加转动惯量

$M_{\dot{\mu}_i}$ ——AUV 俯仰方向附加转动惯量

D_{v_i} ——AUV 前进方向线性阻尼系数

D_{vv_i} ——AUV 前进方向二次阻尼系数

D_{ω_i} ——AUV 偏航方向线性阻尼系数

$D_{\omega\omega_i}$ ——AUV 偏航方向二次阻尼系数

D_{μ_i} ——AUV 俯仰方向线性阻尼系数

$D_{\mu\mu_i}$ ——AUV 俯仰方向二次阻尼系数

F_i ——AUV 前向推力

Γ_i ——AUV 偏航力矩

M_i ——AUV 俯仰力矩

$[F_i \ \Gamma_i \ M_i]^T$ 为 V_i 动力学模型的控制输入,也是本文围捕控制中最终设计的控制输入。

1.2 三维目标围捕问题

控制目标是设计一种分布式三维目标球状围捕控制器,使所有 AUV 能够逐渐收敛到以运动目标 T 为球心、半径为 R 的球状围捕队形,并沿目标运动方向在球面上进行有序环绕,实现三维环绕编队,如图 2 所示。

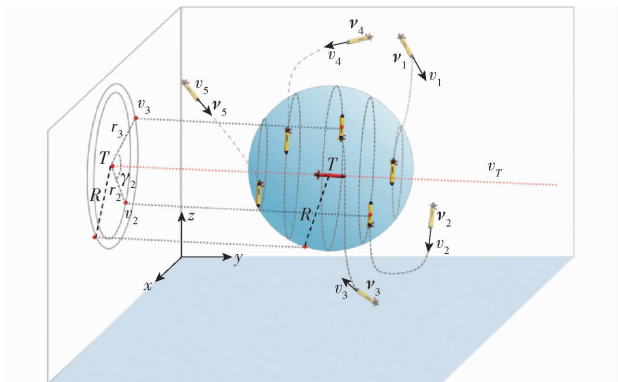


图 2 三维目标围捕示意图

Fig. 2 Three-dimensional target encirclement

目标 T 的运动学模型为

$$\begin{cases} \dot{x}_T = v_x \\ \dot{y}_T = v_y \\ \dot{z}_T = v_z \end{cases} \quad (4)$$

式中 x_T ——惯性坐标系下目标 T 的横坐标
 y_T ——惯性坐标系下目标 T 的纵坐标
 z_T ——惯性坐标系下目标 T 的竖坐标
 v_x ——目标 T 的 x 方向速度
 v_y ——目标 T 的 y 方向速度
 v_z ——目标 T 的 z 方向速度

假设 1: 目标 T 的运动状态连续有界,且目标速度 $\mathbf{v}_T = [v_x, v_y, v_z]^T$ 不存在突变。

由于水下通信资源受限,本文中多 AUV 系统的信息交互拓扑为有向环结构,即 V_i 仅能与其邻居 V_{i+1} 进行信息交互。该拓扑结构仅需要 N 条通信链路即可完成多 AUV 系统中的信息传递,适用于水下通信资源受限的应用场景。在这里, $V_{N+1} = V_1$ 。

每个航行器是在信息受限条件下设计控制器的,而这个信息受限主要体现在自身绝对位置信息的缺失和部分航行器对于目标信息的缺失。

考虑到水下工作环境的特殊性,航行器无法获得 GPS 信号,从而每个 AUV 的水下绝对位置信息无法轻易获得。因此,本文利用局部坐标系下的相对位置信息设计控制器,而不是航行器的绝对位置信息。每个航行器安装的传感器可以测量其邻居在自身局部坐标系下的相对位置信息 $\boldsymbol{\mu}_+^{(i)}$,表达式为

$$\boldsymbol{\mu}_+^{(i)} := \mathbf{R}(\theta_i, \psi_i) \begin{bmatrix} x_{i+1} - x_i \\ y_{i+1} - y_i \\ z_{i+1} - z_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中

$$\mathbf{R}(\theta_i, \psi_i) = \begin{bmatrix} \cos\psi_i \cos\theta_i & \cos\psi_i \sin\theta_i & \sin\psi_i \\ -\sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 \\ -\sin\psi_i \cos\theta_i & -\sin\psi_i \sin\theta_i & \cos\psi_i \end{bmatrix}$$

$\mathbf{R}(\theta_i, \psi_i)$ 为旋转矩阵,用于将惯性坐标系的坐标转换为局部坐标系上的坐标; $\boldsymbol{\mu}_+^{(i)}$ 可通过水声定位系统(如超短基线定位系统)获得; $:=$ 为定义符号。

另外,部分航行器 V_i (至少 1 个)可测量获得目

标 T 的相对位置信息 $\boldsymbol{\mu}_0^{(i)}$,具体表达式为

$$\boldsymbol{\mu}_0^{(i)} := \mathbf{R}(\theta_i, \psi_i) \begin{bmatrix} x_T - x_i \\ y_T - y_i \\ z_T - z_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

$\boldsymbol{\mu}_0^{(i)}$ 可以通过安装前视声呐或者其他目标检测声呐获得。

定义集合 $\mathcal{V}$ 为能检测到目标的航行器,集合 $\hat{\mathcal{V}}$ 为无法检测到目标的航行器,即 $\mathcal{V}: \{i | V_i \text{ 能直接获取目标 } T \text{ 的相对位置 } \boldsymbol{\mu}_0^{(i)}\}, \hat{\mathcal{V}}: \{i | V_i \text{ 不能够直接获取目标 } T \text{ 的相对位置 } \boldsymbol{\mu}_0^{(i)}\}$ 。同时,定义 V_i 与其邻居 V_{i+1} 相对于目标 T 的分离角 Y_i 为

$$Y_i := \text{atan2}(y_{i+1} - y_T, x_{i+1} - x_T) - \text{atan2}(y_i - y_T, x_i - x_T)$$

2 分布式三维目标围捕控制器设计

信息受限条件下多 AUV 三维运动目标围捕控制器整体控制框图如图 3 所示。具体而言,首先设计分布式目标相对位置-速度估计器,使无法直接测量目标的 AUV 能够通过有向环拓扑下的邻居信息交互获得目标相对位置及相对速度估计;其次,引入虚拟辅助系统,根据目标运动方向构造球状围捕队形的旋转轴,并为每个 AUV 生成位于目标周围球面上的期望相对偏移量,从而将三维运动目标围捕问题转换为真实 AUV 对虚拟辅助轨迹的局部相对跟踪问题;进一步设计围捕运动学控制器得到期望控制指令;最后结合 AUV 动力学模型和低通滤波器设计速度跟踪控制器,实现多 AUV 对运动目标的协同围捕。

2.1 分布式目标相对位置-速度估计器

为解决目标信息部分缺失条件下的运动目标围捕问题,本文提出并设计了分布式目标相对位置-速度估计器(Relative position - velocity estimator,

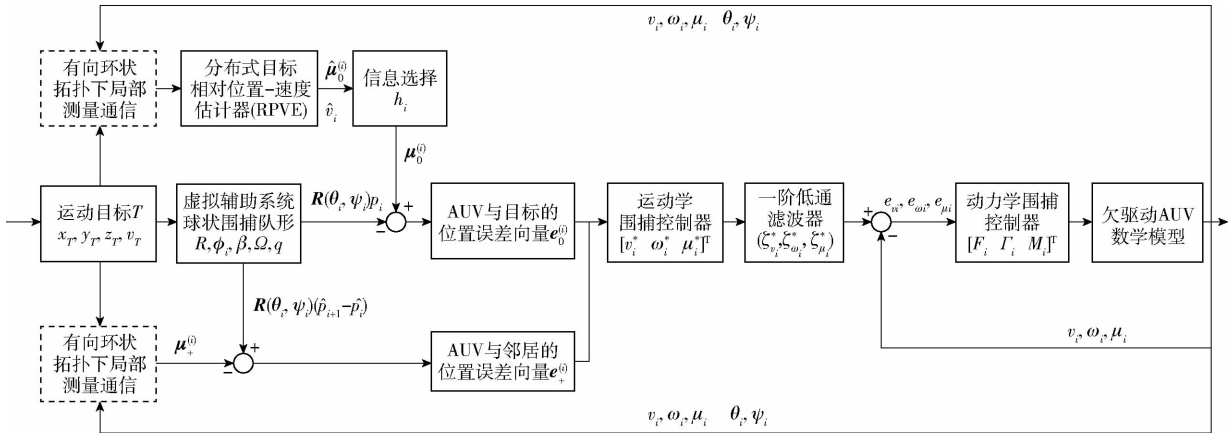


图 3 多 AUV 三维目标围捕控制框图

Fig. 3 Block diagram of multi-AUV three-dimensional target encirclement control system

RPVE), 使无法直接观测目标的 AUV 能够通过局部邻居通信获得目标状态估计信息。

为描述 V_i 是否能够直接获得目标相对信息, 定义目标信息可得性变量 h_i , 具体表达式为

$$h_i = \begin{cases} 1 & (i \in \mathcal{V}) \\ 0 & (i \in \hat{\mathcal{V}}) \end{cases} \quad (7)$$

根据式(5)和式(6)可知

$$\boldsymbol{\mu}_0^{(i)} = \boldsymbol{\mu}_+^{(i)} + \mathbf{R}(\theta_i, \psi_i) \mathbf{R}^T(\theta_{i+1}, \psi_{i+1}) \boldsymbol{\mu}_0^{(i+1)} \quad (8)$$

其中 $\boldsymbol{\mu}_0^{(i+1)}$ 为邻居 V_{i+1} 对目标的相对位置, $\mathbf{R}(\theta_{i+1}, \psi_{i+1})$ 为邻居 V_{i+1} 的旋转矩阵。

考虑到 RPVE 需要将各信息进行坐标统一, 定义旋转变换矩阵 $\mathbf{R}_{in}(\theta_i, \psi_i)$, 将邻居 V_{i+1} 的目标相对位置估计 $\boldsymbol{\mu}_0^{(i+1)}$ 变换到 V_i 所在本体坐标系下的表达, 其表达式为

$$\mathbf{R}_{in}(\theta_i, \psi_i) := \mathbf{R}(\theta_i, \psi_i) \mathbf{R}^T(\theta_{i+1}, \psi_{i+1}) \quad (9)$$

由于本文考虑的多 AUV 系统的通信结构为环状拓扑, 在设计 RPVE 前, 先设计基于通信结构的一致性误差项, 其表达式为

$$\boldsymbol{\zeta}_i = \{ \boldsymbol{\mu}_+^{(i)} + \mathbf{R}_{in}(\theta_i, \psi_i) \hat{\boldsymbol{\mu}}_0^{(i+1)} - \hat{\boldsymbol{\mu}}_0^{(i)} \} + \{ h_i (\boldsymbol{\mu}_0^{(i)} - \hat{\boldsymbol{\mu}}_0^{(i)}) \} \quad (10)$$

其中 $\hat{\boldsymbol{\mu}}_0^{(i)}$ 表示目标 T 相对于航行器 V_i 的位置估计, 且该估计量在 V_i 自身的本体坐标系下表示。式中, 第 1 项为邻居一致性误差, 用于使 V_i 对的目标相对位置估计与邻居信息推算得到的目标相对位置保持一致; 第 2 项为目标测量修正项, 当 $h_i = 1$ 时, 利用本航行器测得的目标相对位置信息对估计值进行校正; 当 $h_i = 0$ 时, 该项为零, V_i 仅依靠邻居通信信息更新估计。

在 V_i 的本体坐标系中, RPVE 为每个 AUV 估计 2 组状态: ① 目标相对位置估计 $\boldsymbol{\mu}_0^{(i)} \in \mathbf{R}^3$ 。② 目标相对速度估计, 其可表示为 $\dot{\boldsymbol{\mu}}_0^{(i)}$, 用于跟踪运动目标。基于上述一致性误差项, 为每个航行器 V_i 设计二阶 RPVE 为

$$\begin{cases} \dot{\hat{\boldsymbol{\mu}}}_0^{(i)} = \gamma_1 \boldsymbol{\zeta}_i + \hat{\mathbf{v}}_i \\ \dot{\hat{\mathbf{v}}}_i = \gamma_2 \boldsymbol{\zeta}_i \end{cases} \quad (11)$$

式中 γ_1, γ_2 ——估计器正增益

$\hat{\mathbf{v}}_i$ —— $\boldsymbol{\mu}_0^{(i)}$ 的导数/相对速度项的估计

参数 γ_1 主要影响目标相对位置估计的一致收敛速度, 参数 γ_2 主要影响目标相对速度估计对运动目标变化的响应能力。与仅包含位置一致性项的一阶估计器相比, 上述二阶 RPVE 引入了相对速度估计状态 $\hat{\mathbf{v}}_i$, 能够在估计层提供一定的运动预测能力, 从而减小运动目标条件下由纯位置反馈带来的滞后误差。一般而言, 增大 γ_1 和 γ_2 可提高估计响应速度, 但

过大会增强通信过程中引起的估计波动, 过小则会降低 RPVE 估计的收敛速度; 此外, 当 γ_1/γ_2 偏大时速度预测项的作用被弱化, 估计器趋近一阶结构; 偏小时估计过程易出现振荡, 因此两者的取值需综合权衡选取。

为了便于控制器的设计, 定义航行器 V_i 在控制器中实际使用的目标相对位置信息为

$$\bar{\boldsymbol{\mu}}_0^{(i)} = h_i \boldsymbol{\mu}_0^{(i)} + (1 - h_i) \hat{\boldsymbol{\mu}}_0^{(i)} \quad (12)$$

当 $h_i = 1$ 时, 有 $\bar{\boldsymbol{\mu}}_0^{(i)} = \boldsymbol{\mu}_0^{(i)}$, 即控制器直接使用传感器测得的目标相对位置信息; 当 $h_i = 0$ 时, 有 $\bar{\boldsymbol{\mu}}_0^{(i)} = \hat{\boldsymbol{\mu}}_0^{(i)}$, 即控制器使用 RPVE 提供的目标相对位置估计信息。

2.2 虚拟辅助系统设计

为实现运动目标 T 的围捕, 考虑一组由虚拟航行器组成的辅助系统, 每个虚拟航行器 $i (i \in \{1, 2, \dots, N\} = N)$ 具有如下运动学模型

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_i = \hat{v}_i \cos \hat{\psi}_i \cos \hat{\theta}_i \\ \dot{\hat{y}}_i = \hat{v}_i \cos \hat{\psi}_i \sin \hat{\theta}_i \\ \dot{\hat{z}}_i = \hat{v}_i \sin \hat{\psi}_i \\ \dot{\hat{\theta}}_i = \hat{\omega}_i \\ \dot{\hat{\psi}}_i = \hat{\mu}_i \end{cases} \quad (13)$$

式中 $\hat{x}_i$ ——第 i 个虚拟航行器横坐标

$\hat{y}_i$ ——第 i 个虚拟航行器纵坐标

$\hat{z}_i$ ——第 i 个虚拟航行器竖坐标

$\hat{\theta}_i$ ——虚拟航行器偏航角

$\hat{\psi}_i$ ——虚拟航行器俯仰角

$\hat{v}_i$ ——虚拟航行器前进速度

$\hat{\omega}_i$ ——虚拟航行器偏航角速度

$\hat{\mu}_i$ ——虚拟航行器俯仰角速度

为实现时变运动目标的围捕任务, 首先需要设计虚拟辅助系统满足原点的循环追踪, 即设定虚拟目标为 $(\hat{x}_T, \hat{y}_T, \hat{z}_T) = (0, 0, 0)$ 。而后设计运动学控制器, 使得航行器 V_i 的轨迹可以收敛于 $(\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{z}_i) + (x_T(t), y_T(t), z_T(t))$ 。引入辅助系统的关键作用是使其虚拟轨迹实现原点的循环追踪, 则虚拟轨迹 $(\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{z}_i)$ 可作为航行器 V_i 实际轨迹的跟踪参考。

为使虚拟航行器在目标周围形成半径为 R 的球状围捕, 第 i 个虚拟航行器对应的球面极角 ϕ_i 为

$$\phi_i = \frac{(i - 0.5)\pi}{N} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (14)$$

由球面几何关系可得, 第 i 个虚拟航行器所在轨道切面圆的半径为 $r_i = R \sin \phi_i$, 其沿球面旋转轴方向的高度偏移为 $R \cos \phi_i$, 可得

$$r_i^2 + (R \cos \phi_i)^2 = R^2 \quad (15)$$

因此,只要虚拟航行器在半径为 r_i 的切面圆上运动,且沿旋转轴方向保持 $R \cos \phi_i$ 的偏移,就能够保证其始终位于以目标为球心、半径为 R 的球面上。

与固定目标围捕不同,运动目标的运动方向会影响围捕队形的空间分布。若仍固定采用惯性坐标系的竖直方向作为旋转轴,则当目标在三维空间中运动时,围捕队形与目标运动方向之间缺乏一致性,无法实现全方位的目标监测。为此,本文选取目标速度方向作为虚拟围捕队形的旋转轴。当 $\|\mathbf{v}_T\| > 0$ 时,定义虚拟围捕旋转轴为

$$\mathbf{q} = \frac{\mathbf{v}_T}{\|\mathbf{v}_T\|} \quad (16)$$

式中 $\mathbf{q}$ ——目标运动方向单位向量

当目标速度较小或目标运动方向暂时无法可靠确定时,为避免旋转轴突变,令 $\mathbf{q} = [0 \ 0 \ 1]^T$ 。旋转轴 $\mathbf{q}$ 可根据目标运动状态自适应确定,形成绕目标运动方向旋转,实现三维运动目标围捕任务。

为了在垂直于 $\mathbf{q}$ 的平面内生成环绕轨迹,选取 2 个与 $\mathbf{q}$ 正交的单位向量 $\boldsymbol{\varepsilon}_1$ 和 $\boldsymbol{\varepsilon}_2$ 。当 $\mathbf{q}$ 不与惯性坐标系竖直方向平行时,取

$$\boldsymbol{\varepsilon}_1 = \frac{[0 \ 0 \ 1]^T \times \mathbf{q}}{\|[0 \ 0 \ 1]^T \times \mathbf{q}\|} \quad (17)$$

若 $\mathbf{q}$ 与惯性坐标系竖直方向接近平行,则可将式(17)中的参考向量替换为 $[1 \ 0 \ 0]^T$,以避免分母为零。进一步定义

$$\boldsymbol{\varepsilon}_2 = \mathbf{q} \times \boldsymbol{\varepsilon}_1 \quad (18)$$

由此可知, $\boldsymbol{\varepsilon}_1$ 、 $\boldsymbol{\varepsilon}_2$ 与 $\mathbf{q}$ 两两正交,且 $\boldsymbol{\varepsilon}_1$ 和 $\boldsymbol{\varepsilon}_2$ 张成的平面垂直于目标运动方向。

定义相邻虚拟航行器之间相位间隔 β 为

$$\beta = \frac{2\pi}{N} \quad (19)$$

可以得到第 i 个虚拟航行器的相位角 $\alpha_i(t)$ 为

$$\alpha_i(t) = \Omega t + (i-1)\beta \quad (20)$$

式中 $\alpha_i(t)$ ——第 i 个虚拟航行器的环绕相位角
 Ω ——虚拟航行器绕旋转轴 $\mathbf{q}$ 运动的角速度
 其中, Ω 用于调节虚拟围捕队形绕目标运动方向的旋转快慢。当 Ω 增大时,各虚拟航行器沿切面圆轨道运动加快,但真实 AUV 跟踪虚拟辅助轨迹时所需的角速度输入也相应增大;当 Ω 减小时,虚拟轨迹变化更加平缓,有利于真实 AUV 平滑跟踪,但围捕队形的环绕速度也会降低。

在垂直于 $\mathbf{q}$ 的平面内,第 i 个虚拟航行器的径向方向可表示为 $\cos \alpha_i(t) \boldsymbol{\varepsilon}_1 + \sin \alpha_i(t) \boldsymbol{\varepsilon}_2$ 。因此,第 i 个虚拟航行器相对于目标中心的期望偏移量,即虚拟航行器的位置 $\hat{\mathbf{p}}_i = [\hat{x}_i \ \hat{y}_i \ \hat{z}_i]^T$ 可以设计为

$$\hat{\mathbf{p}}_i = R \cos \phi_i \mathbf{q} + r_i (\cos \alpha_i(t) \boldsymbol{\varepsilon}_1 + \sin \alpha_i(t) \boldsymbol{\varepsilon}_2) \quad (21)$$

式(21)表明,虚拟偏移 $\hat{\mathbf{p}}_i$ 由 2 部分组成,第 1 部分表示沿目标运动方向的轴向偏移;第 2 部分表示在垂直于目标运动方向的平面内的环绕偏移。

由 $\boldsymbol{\varepsilon}_1$ 和 $\boldsymbol{\varepsilon}_2$ 均垂直于 $\mathbf{q}$ 可得

$$\|\hat{\mathbf{p}}_i\|^2 = (R \cos \phi_i)^2 + r_i^2 = R^2 \quad (22)$$

因此,虚拟航行器始终位于以目标为球心、半径为 R 的球面上。同时,不同 AUV 具有不同的极角 ϕ_i 和相位角 $\alpha_i(t)$,因此能够在球面上形成三维分布,而不是仅在同一平面内形成圆形围捕。

在实际控制中,真实 AUV 不直接使用式(21)构造惯性坐标系下的绝对期望位置,而是使用该虚拟偏移在自身局部坐标系下的表达。对 V_i 而言,虚拟偏移在其局部坐标系下表示为 $\mathbf{R}(\theta_i, \psi_i) \hat{\mathbf{p}}_i$ 。因此,当 V_i 处于期望围捕位置时,目标相对于该 AUV 的局部位置应满足

$$\bar{\boldsymbol{\mu}}_0^{(i)} + \mathbf{R}(\theta_i, \psi_i) \hat{\mathbf{p}}_i = 0 \quad (23)$$

式(23)说明真实 AUV 并不是跟踪某个绝对位置,而是使自身测得或估计得到的目标相对位置 $\bar{\boldsymbol{\mu}}_0^{(i)}$ 与虚拟偏移 $\mathbf{R}(\theta_i, \psi_i) \hat{\mathbf{p}}_i$ 满足相对几何关系。

进一步可以得到虚拟辅助系统中相邻 2 个虚拟航行器之间的期望相对偏移为 $\hat{\mathbf{p}}_{i+1} - \hat{\mathbf{p}}_i$,其中 $\hat{\mathbf{p}}_{i+1} = [\hat{x}_{i+1} \ \hat{y}_{i+1} \ \hat{z}_{i+1}]^T$ 为邻居虚拟航行器的位置,所以第 i 个虚拟航行器的局部坐标系下的邻居相对位置

$\tilde{\boldsymbol{\mu}}_+^{(i)}$ 为

$$\tilde{\boldsymbol{\mu}}_+^{(i)} = \mathbf{R}(\theta_i, \psi_i) \begin{bmatrix} \hat{x}_{i+1} - \hat{x}_i \\ \hat{y}_{i+1} - \hat{y}_i \\ \hat{z}_{i+1} - \hat{z}_i \end{bmatrix} = \mathbf{R}(\theta_i, \psi_i) (\hat{\mathbf{p}}_{i+1} - \hat{\mathbf{p}}_i) \quad (24)$$

若真实 AUV 的相对队形与虚拟辅助系统一致,则应满足

$$\boldsymbol{\mu}_+^{(i)} - \mathbf{R}(\theta_i, \psi_i) (\hat{\mathbf{p}}_{i+1} - \hat{\mathbf{p}}_i) = 0 \quad (25)$$

可见,式(23)和式(25)分别描述了真实 AUV 相对于目标的期望关系以及相对于邻居的期望关系。二者均仅依赖局部相对信息,不依赖真实 AUV 或目标的绝对位置。

2.3 运动学围捕控制器设计及分析

控制器设计过程中,首先假定 $[v_i \ \omega_i \ \mu_i]^T = [v_i^* \ \omega_i^* \ \mu_i^*]^T$,即运动学控制器的输入即为动力学控制器的输出。在虚拟辅助系统给出期望偏移 $\hat{\mathbf{p}}_i$ 后,需要设计真实 AUV 的控制输入,使每个 AUV 在局部相对信息条件下逐渐收敛到对应的虚拟围捕位置。由前文分析可知,航行器 V_i 的控制目标可以分为 2 部分:①使 AUV 与目标之间满足期望相对位

置关系。②使 AUV 与邻居 AUV 之间满足期望相对队形关系。

根据式(23), 定义 V_i 与目标 T 的位置误差向量 $\mathbf{e}_0^{(i)}$ 以及邻居的位置误差向量 $\mathbf{e}_+^{(i)}$ 为

$$\mathbf{e}_0^{(i)} = -\bar{\boldsymbol{\mu}}_0^{(i)} - \mathbf{R}(\theta_i, \psi_i) \hat{\mathbf{p}}_i \quad (26)$$

$$\mathbf{e}_+^{(i)} = -\boldsymbol{\mu}_+^{(i)} + \mathbf{R}(\theta_i, \psi_i) \begin{bmatrix} \hat{x}_{i+1} - \hat{x}_i \\ \hat{y}_{i+1} - \hat{y}_i \\ \hat{z}_{i+1} - \hat{z}_i \end{bmatrix} = -\boldsymbol{\mu}_+^{(i)} + \mathbf{R}(\theta_i, \psi_i) \begin{bmatrix} \hat{x}_+^{(i)} \\ \hat{y}_+^{(i)} \\ \hat{z}_+^{(i)} \end{bmatrix} \quad (27)$$

为了书写简便, 定义变量 $(\hat{x}_+^{(i)}, \hat{y}_+^{(i)}, \hat{z}_+^{(i)}) = (\hat{x}_{i+1} - \hat{x}_i, \hat{y}_{i+1} - \hat{y}_i, \hat{z}_{i+1} - \hat{z}_i)$ 。

对于每个航行器 V_i , 设计并提出如下基于虚拟辅助系统的分布式控制器

$$\begin{bmatrix} v_i \\ \omega_i \\ \mu_i \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} v_i^* \\ \omega_i^* \\ \mu_i^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \delta \cos \psi_i & 0 \\ 0 & 0 & \delta \end{bmatrix}^{-1} \cdot [\mathbf{R}(\theta_i, \psi_i) [\dot{\hat{x}}_i \ \dot{\hat{y}}_i \ \dot{\hat{z}}_i]^\top - k_e (\mathbf{e}_0^{(i)} - \mathbf{e}_0)] \quad (28)$$

其中 $\mathbf{e}_0 = [-\delta \ 0 \ 0]^\top$, 参数 δ 为任意小的正数, 其取值越小, 理论几何偏置越小, 但控制律中的角速度和俯仰角速度项可能被放大; 因此仿真中取 $\delta \ll R$, 以兼顾围捕精度和控制输入平滑性。控制参数 k_e 对所有航行器是一致的。

为分析所设计控制器的收敛性, 定义航行器 V_i 的局部跟踪误差 $\tilde{\mathbf{e}}_i$ 为

$$\tilde{\mathbf{e}}_i = \mathbf{e}_0^{(i)} - \mathbf{e}_0 \quad (29)$$

位置误差向量 $\mathbf{e}_0^{(i)}$ 随时间微分, 可得

$$\dot{\mathbf{e}}_0^{(i)} = -\dot{\bar{\boldsymbol{\mu}}}_0^{(i)} - \dot{\mathbf{R}}(\theta_i, \psi_i) \begin{bmatrix} \hat{x}_i \\ \hat{y}_i \\ \hat{z}_i \end{bmatrix} - \mathbf{R}(\theta_i, \psi_i) \begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_i \\ \dot{\hat{y}}_i \\ \dot{\hat{z}}_i \end{bmatrix} = -\dot{\bar{\boldsymbol{\mu}}}_0^{(i)} - \begin{bmatrix} 0 & \omega_i \cos \psi_i & \mu_i \\ -\omega_i \cos \psi_i & 0 & \omega_i \sin \psi_i \\ -\mu_i & -\omega_i \sin \psi_i & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{x}_i \\ \hat{y}_i \\ \hat{z}_i \end{bmatrix} - \mathbf{R}(\theta_i, \psi_i) \begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_i \\ \dot{\hat{y}}_i \\ \dot{\hat{z}}_i \end{bmatrix} \quad (30)$$

定义 $\mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \delta \cos \psi_i & 0 \\ 0 & 0 & \delta \end{bmatrix}$, 由式(23)中 $\bar{\boldsymbol{\mu}}_0^{(i)}$ 的

定义, AUV 运动学模型式(1)和分布式围捕控制器式(28), 可将误差向量 $\mathbf{e}_0^{(i)}$ 的导数整理为

$$\dot{\mathbf{e}}_0^{(i)} = \mathbf{B}_i \begin{bmatrix} v_i \\ \omega_i \\ \mu_i \end{bmatrix} - \mathbf{R}(\theta_i, \psi_i) \begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_i \\ \dot{\hat{y}}_i \\ \dot{\hat{z}}_i \end{bmatrix} + \mathbf{d}_i(t) \quad (31)$$

其中, $\mathbf{d}_i(t)$ 表示由目标运动速度、RPVE 估计误差以及姿态变换高阶项引起的有界扰动项。当目标运动速度有界且 RPVE 估计误差有界时, 存在常数 $\bar{d}_i > 0$, 使得

$$\|\mathbf{d}_i(t)\| \leq \bar{d}_i \quad (32)$$

将运动学控制器式(28)代入式(31), 可得

$$\dot{\mathbf{e}}_0^{(i)} = -k_e (\mathbf{e}_0^{(i)} - \mathbf{e}_0) + \mathbf{d}_i(t) \quad (33)$$

所以航行器 V_i 的局部跟踪误差 $\tilde{\mathbf{e}}_i$ 导数为

$$\dot{\tilde{\mathbf{e}}}_i = \dot{\mathbf{e}}_0^{(i)} - \dot{\mathbf{e}}_0 = -k_e \tilde{\mathbf{e}}_i + \mathbf{d}_i(t) \quad (34)$$

从式(34)可见, 航行器 V_i 的局部跟踪误差满足带有界扰动的一阶稳定系统。若忽略目标运动速度和估计误差的影响, 即 $\mathbf{d}_i(t) = 0$, 则有

$$\dot{\tilde{\mathbf{e}}}_i = -k_e \tilde{\mathbf{e}}_i \quad (35)$$

其为一个标准的一阶线性自治误差系统。由于 $k_e > 0$, 系统矩阵 $-k_e \mathbf{I}$ 的全部特征值均为 $-k_e$, 其实部严格小于零, 因此该误差系统是指数稳定的。对式(35)求解可得

$$\tilde{\mathbf{e}}_i(t) = e^{-k_e t} \tilde{\mathbf{e}}_i(0) \quad (36)$$

进一步取范数, 有

$$\|\tilde{\mathbf{e}}_i(t)\| = \|e^{-k_e t} \tilde{\mathbf{e}}_i(0)\| \leq e^{-k_e t} \|\tilde{\mathbf{e}}_i(0)\| \quad (37)$$

可以看到, 随着时间 t 增大, 指数项 $e^{-k_e t}$ 单调衰减并趋于零, 因此 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|\tilde{\mathbf{e}}_i(t)\| = 0$ 。又因为 $\tilde{\mathbf{e}}_i = \mathbf{e}_0^{(i)} - \mathbf{e}_0$, 所以当 $t \rightarrow \infty$ 时, 有 $\mathbf{e}_0^{(i)} \rightarrow \mathbf{e}_0$, 说明航行器 V_i 的局部跟踪误差能够指数收敛到期望误差 $\mathbf{e}_0$ 。参数 k_e 决定误差衰减速度, k_e 越大, 指数项 $e^{-k_e t}$ 衰减越快, AUV 相对于虚拟辅助轨迹的跟踪误差收敛速度越快。但与此同时, 过大的 k_e 也会增大控制输入变化幅度。

对于运动目标和目标不可见情形, 扰动项 $\mathbf{d}_i(t)$ 一般不为零。选取李雅普诺夫函数

$$V_{k_i} = \frac{\|\mathbf{e}_0^{(i)} - \mathbf{e}_0\|^2}{2} \quad (38)$$

对其求导并结合式(34), 有

$$\dot{V}_{k_i} = -k_e \|\mathbf{e}_0^{(i)} - \mathbf{e}_0\|^2 + (\mathbf{e}_0^{(i)} - \mathbf{e}_0)^\top \mathbf{d}_i(t) \quad (39)$$

由柯西不等式可得 $\dot{V}_{k_i} \leq -k_e \|\mathbf{e}_0^{(i)} - \mathbf{e}_0\|^2 + \bar{d}_i \|\mathbf{e}_0^{(i)} - \mathbf{e}_0\|$ 。当 $\|\mathbf{e}_0^{(i)} - \mathbf{e}_0\| > \bar{d}_i / k_e$ 时, 有 $\dot{V}_{k_i} < 0$,

因此闭环误差 $\tilde{\mathbf{e}}_i$ 最终有界,并满足

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{e}_0^{(i)} - \mathbf{e}_0\| \leq \frac{\bar{d}_i}{k_e} \quad (40)$$

由式(40)可知,增大控制增益 k_e 、减小目标运动速度或提高 RPVE 估计精度,均可缩小真实 AUV 相对于虚拟辅助轨迹的最终误差界。

进一步分析其几何意义。由式(26)可知,当 $\mathbf{e}_0^{(i)}$ 收敛到 $\mathbf{e}_0$ 的邻域时,有

$$-\bar{\boldsymbol{\mu}}_0^{(i)} - \mathbf{R}(\theta_i, \psi_i) \hat{\mathbf{p}}_i \rightarrow \mathbf{e}_0 \quad (41)$$

若 V_i 能够直接获得目标信息,则 $\bar{\boldsymbol{\mu}}_0^{(i)} = \boldsymbol{\mu}_0^{(i)} =$

$$\mathbf{R}(\theta_i, \psi_i) \begin{bmatrix} x_T - x_i \\ y_T - y_i \\ z_T - z_i \end{bmatrix}, \text{代入式(41)可得}$$

$$\begin{bmatrix} x_i - x_T \\ y_i - y_T \\ z_i - z_T \end{bmatrix} - \hat{\mathbf{p}}_i \rightarrow \mathbf{R}^T(\theta_i, \psi_i) \mathbf{e}_0 \quad (42)$$

其表明真实 AUV 相对于目标的位置最终收敛到虚拟辅助系统给出的相对偏移 $\hat{\mathbf{p}}_i$ 的邻域内且该邻域大小由 δ 以及扰动最终界共同决定。当 δ 和 $\bar{d}_i/k_e$ 足够小时, AUV 收敛到虚拟辅助系统给出的目标相对围捕位置邻域。

由虚拟辅助系统设计可知 $\|\hat{\mathbf{p}}_i\| = R$, 因此根据式(42)可得

$$\left\| \begin{bmatrix} x_i - x_T \\ y_i - y_T \\ z_i - z_T \end{bmatrix} \right\| - R \leq \delta + \frac{\bar{d}_i}{k_e} \quad (43)$$

式(43)表明, V_i 与目标之间的距离最终收敛到半径 R 的小邻域,其大小由 δ 、目标运动扰动、RPVE 估计误差以及控制增益 k_e 决定。

若 V_i 不能够直接获得目标信息,有 $\bar{\boldsymbol{\mu}}_0^{(i)} = \hat{\boldsymbol{\mu}}_0^{(i)}$, 此时控制器使用 RPVE 提供的目标相对位置估计信息。由 RPVE 设计可知,当有向环拓扑中至少存在一个 AUV 能够直接获得目标信息时,目标相对位置估计误差能够通过邻居通信在系统中传递并逐渐减小。因此,对于不能够直接获得目标信息的 V_i ,其闭环误差可看作在式(37)的基础上叠加了由估计误差引起的有界扰动。当 RPVE 估计误差足够小时,该扰动项也趋于较小范围, AUV 仍能够收敛到虚拟辅助系统给出的期望相对位置附近。

进一步考虑相邻 AUV 之间的队形关系。根据式(42),对于邻居 AUV 有

$$\begin{bmatrix} x_{i+1} - x_T \\ y_{i+1} - y_T \\ z_{i+1} - z_T \end{bmatrix} \rightarrow \hat{\mathbf{p}}_{i+1} + \mathbf{R}^T(\theta_{i+1}, \psi_{i+1}) \mathbf{e}_0 \quad (44)$$

式(44)与式(42)相减可以得到

$$\begin{bmatrix} x_{i+1} - x_i \\ y_{i+1} - y_i \\ z_{i+1} - z_i \end{bmatrix} \rightarrow \hat{\mathbf{p}}_{i+1} - \hat{\mathbf{p}}_i + \{\mathbf{R}^T(\theta_{i+1}, \psi_{i+1}) - \mathbf{R}^T(\theta_i, \psi_i)\} \mathbf{e}_0 \quad (45)$$

由于 $\mathbf{e}_0 = [-\delta \quad 0 \quad 0]^T$, 当 δ 足够小时,式(45)中最后一项可以看作小量。因此,相邻 AUV 的相对位置将收敛到虚拟辅助系统给出的期望相对偏移 $\hat{\mathbf{p}}_{i+1} - \hat{\mathbf{p}}_i$ 附近,即 $\mathbf{e}_+^{(i)} \rightarrow 0$ 或收敛到由 δ 和扰动项决定的小邻域内。这说明真实 AUV 之间的相对队形能够与虚拟辅助系统中虚拟 AUV 之间的相对队形保持一致。

2.4 动力学围捕控制器设计及分析

将上述所设计的运动学控制器式(28)应用于航行器的动力学模型式(2),也就是说考虑航行器 V_i 的前进速度 v_i 、偏航角速度 ω_i 、俯仰角速度 μ_i 与运动学控制器输入存在误差,即 $(v_i, \omega_i, \mu_i) \neq (v_i^*, \omega_i^*, \mu_i^*)$ 。

为避免控制器设计过程中繁琐的微分运算,并同时处理目标运动速度和加速度未知的情况,设计一阶低通滤波器

$$\tau \begin{bmatrix} \dot{\zeta}_{v_i} \\ \dot{\zeta}_{\omega_i} \\ \dot{\zeta}_{\mu_i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \zeta_{v_i} \\ \zeta_{\omega_i} \\ \zeta_{\mu_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_i^* \\ \omega_i^* \\ \mu_i^* \end{bmatrix} \quad (46)$$

式中 ζ_{v_i} ——滤波器前进状态变量

ζ_{ω_i} ——滤波器偏航状态变量

ζ_{μ_i} ——滤波器俯仰状态变量

τ ——时间常数

时间常数 $\tau > 0$ 影响滤波输出的跟踪精度和闭环稳定性, τ 越小则滤波输出对期望速度指令的跟踪越及时。当 τ 足够小时,一阶低通滤波器 $(\dot{\zeta}_{v_i}, \dot{\zeta}_{\omega_i}, \dot{\zeta}_{\mu_i})$ 的输出值与 $(v_i^*, \omega_i^*, \mu_i^*)$ 近似相等,其中滤波器状态变量的初始值满足等式

$$\begin{bmatrix} \zeta_{v_i}(t_0) \\ \zeta_{\omega_i}(t_0) \\ \zeta_{\mu_i}(t_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_i^*(t_0) \\ \omega_i^*(t_0) \\ \mu_i^*(t_0) \end{bmatrix} \quad (47)$$

定义动力学层面的跟踪误差为

$$\begin{cases} e_{v_i} = v_i - v_i^* \\ e_{\omega_i} = \omega_i - \omega_i^* \\ e_{\mu_i} = \mu_i - \mu_i^* \end{cases} \quad (48)$$

$$\begin{cases} \tilde{\zeta}_{v_i} = \zeta_{v_i} - v_i^* \\ \tilde{\zeta}_{\omega_i} = \zeta_{\omega_i} - \omega_i^* \\ \tilde{\zeta}_{\mu_i} = \zeta_{\mu_i} - \mu_i^* \end{cases} \quad (49)$$

对于每个航行器 V_i , 设计并提出动力学围捕控制器为

$$\begin{bmatrix} F_i \\ \Gamma_i \\ M_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{v_i} & 0 & 0 \\ 0 & m_{\omega_i} & 0 \\ 0 & 0 & m_{\mu_i} \end{bmatrix} \cdot \left\{ -k_d \begin{bmatrix} e_{v_i} \\ e_{\omega_i} \\ e_{\mu_i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\tilde{\zeta}}_{v_i} \\ \dot{\tilde{\zeta}}_{\omega_i} \\ \dot{\tilde{\zeta}}_{\mu_i} \end{bmatrix} \right\} + \begin{bmatrix} d_{v_i} \\ d_{\omega_i} \\ d_{\mu_i} \end{bmatrix} \quad (50)$$

式中 k_d ——正的控制增益

增益 k_d 决定动力学层面速度跟踪误差的收敛速度。 k_d 越大, 则误差收敛越快, 但所需的控制力与力矩也相应增大; 由后文式(55)可知, k_d 与 τ 需结合虚拟控制输入变化幅度协调选取, 以满足闭环系统最终有界的稳定性条件。

定理: 考虑由运动学模型式(1)和动力学模型式(2)描述的三维欠驱动 AUV 系统, 设计运动学控制器式(28)生成期望速度指令 $(v_i^*, \omega_i^*, \mu_i^*)$, 并设计基于低通滤波器式(46)的动力学控制器式(50), 则在控制增益 $k_d > 0$, 滤波时间常数 $\tau > 0$ 情况下, 闭环系统动力学跟踪误差 $(e_{v_i}, e_{\omega_i}, e_{\mu_i})$ 以及滤波误差 $(\tilde{\zeta}_{v_i}, \tilde{\zeta}_{\omega_i}, \tilde{\zeta}_{\mu_i})$ 一致最终有界。进一步地, 整个三维 AUV 围捕闭环系统一致最终有界。

证明: 定义李雅普诺夫函数

$$V_{d_i} = \frac{1}{2} \left\| \begin{bmatrix} e_{v_i} \\ e_{\omega_i} \\ e_{\mu_i} \end{bmatrix} \right\|^2 + \frac{1}{2} \left\| \begin{bmatrix} \tilde{\zeta}_{v_i} \\ \tilde{\zeta}_{\omega_i} \\ \tilde{\zeta}_{\mu_i} \end{bmatrix} \right\|^2 \quad (51)$$

将式(51)对时间求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_{d_i} &= [e_{v_i} \quad e_{\omega_i} \quad e_{\mu_i}] \cdot \left\{ -k_d \begin{bmatrix} e_{v_i} \\ e_{\omega_i} \\ e_{\mu_i} \end{bmatrix} - \frac{1}{\tau} \begin{bmatrix} \tilde{\zeta}_{v_i} \\ \tilde{\zeta}_{\omega_i} \\ \tilde{\zeta}_{\mu_i} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_i^* \\ \omega_i^* \\ \mu_i^* \end{bmatrix} \right\} + \\ &\quad \left\{ \begin{bmatrix} \tilde{\zeta}_{v_i} & \tilde{\zeta}_{\omega_i} & \tilde{\zeta}_{\mu_i} \end{bmatrix} - \frac{1}{\tau} \begin{bmatrix} \tilde{\zeta}_{v_i} \\ \tilde{\zeta}_{\omega_i} \\ \tilde{\zeta}_{\mu_i} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_i^* \\ \omega_i^* \\ \mu_i^* \end{bmatrix} \right\} \end{aligned} \quad (52)$$

由于虚拟控制输入 $U_i := [v_i^*, \omega_i^*, \mu_i^*]^T$ 及其导数有界, 因此存在正常数 $\mathcal{M}_i$, 使得 $\|U_i\| \leq \mathcal{M}_i$ 。由柯西不等式和 Young 不等式可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_{d_i} &\leq -\left(k_d - \frac{1}{2\tau}\right) \left\| \begin{bmatrix} e_{v_i} \\ e_{\omega_i} \\ e_{\mu_i} \end{bmatrix} \right\|^2 - \frac{1}{2\tau} \left\| \begin{bmatrix} \tilde{\zeta}_{v_i} \\ \tilde{\zeta}_{\omega_i} \\ \tilde{\zeta}_{\mu_i} \end{bmatrix} \right\|^2 + \\ &\quad \left\{ \left\| \begin{bmatrix} e_{v_i} \\ e_{\omega_i} \\ e_{\mu_i} \end{bmatrix} \right\| + \left\| \begin{bmatrix} \tilde{\zeta}_{v_i} \\ \tilde{\zeta}_{\omega_i} \\ \tilde{\zeta}_{\mu_i} \end{bmatrix} \right\| \right\} \|U_i\| \end{aligned} \quad (53)$$

对于任意正常数 $a > 0$, 有

$$\begin{cases} \left\| \begin{bmatrix} e_{v_i} \\ e_{\omega_i} \\ e_{\mu_i} \end{bmatrix} \right\| \|U_i\| \leq \frac{\left\| \begin{bmatrix} e_{v_i} \\ e_{\omega_i} \\ e_{\mu_i} \end{bmatrix} \right\|^2}{2a} + \frac{a}{2} \\ \left\| \begin{bmatrix} \tilde{\zeta}_{v_i} \\ \tilde{\zeta}_{\omega_i} \\ \tilde{\zeta}_{\mu_i} \end{bmatrix} \right\| \|U_i\| \leq \frac{\left\| \begin{bmatrix} \tilde{\zeta}_{v_i} \\ \tilde{\zeta}_{\omega_i} \\ \tilde{\zeta}_{\mu_i} \end{bmatrix} \right\|^2}{2a} + \frac{a}{2} \end{cases} \quad (54)$$

若控制参数满足

$$\begin{cases} k_d - \frac{1}{2\tau} \geq \frac{\mathcal{M}_i^2}{2a} + \alpha_0 \\ \frac{1}{2\tau} \geq \frac{\mathcal{M}_i^2}{2a} + \alpha_0 \end{cases} \quad (\alpha_0 > 0) \quad (55)$$

则式(53)变为

$$\begin{aligned} \dot{V}_{d_i} &\leq -\alpha_0 \left(\left\| \begin{bmatrix} e_{v_i} \\ e_{\omega_i} \\ e_{\mu_i} \end{bmatrix} \right\|^2 + \left\| \begin{bmatrix} \tilde{\zeta}_{v_i} \\ \tilde{\zeta}_{\omega_i} \\ \tilde{\zeta}_{\mu_i} \end{bmatrix} \right\|^2 \right) - \\ &\quad \frac{\mathcal{M}_i^2 \left(1 - \frac{\|U_i\|^2}{\mathcal{M}_i^2} \right)}{2a} \left(\left\| \begin{bmatrix} e_{v_i} \\ e_{\omega_i} \\ e_{\mu_i} \end{bmatrix} \right\|^2 + \left\| \begin{bmatrix} \tilde{\zeta}_{v_i} \\ \tilde{\zeta}_{\omega_i} \\ \tilde{\zeta}_{\mu_i} \end{bmatrix} \right\|^2 \right) + a \leq \\ &\quad -2\alpha_0 V_{d_i} + a \end{aligned} \quad (56)$$

求解式(56)可得

$$0 \leq V_{d_i}(t) \leq \frac{a}{2\alpha_0} + \left(V_{d_i}(0) - \frac{a}{2\alpha_0} \right) e^{-2\alpha_0 t} \quad (57)$$

因此, 闭环系统动力学跟踪误差 $(e_{v_i}, e_{\omega_i}, e_{\mu_i})$ 以

及滤波误差 $(\tilde{\zeta}_{v_i}, \tilde{\zeta}_{\omega_i}, \tilde{\zeta}_{\mu_i})$ 一致最终有界。进一步,构造整体闭环系统的李雅普诺夫函数

$$V_i = V_{d_i} + V_{k_i}$$

(58)

结合运动学围捕控制器的稳定性分析,以及上述动力学误差系统的最终有界性,可知存在正常数 $\alpha_0 > 0$,使得当 $t \rightarrow \infty$ 时有

$$0 \leq V_i(t) \leq \frac{a}{2\alpha_0} + r_e$$

(59)

式中 r_e ——所有 AUV 运动学跟踪误差李雅普诺夫函数的统一最终上界

因此,整体闭环系统一致最终有界。

3 仿真验证

为验证所提出分布式围捕控制器对运动目标的有效性,本文设计了 2 组仿真实验:目标信息完全可得下的运动目标围捕和目标信息部分缺失下结合 RPVE 的运动目标围捕。两组仿真中,AUV 的初始位置在以目标为中心、半径为 20 m 的球形区域内随机生成;初始航向角 θ_i 和俯仰角 ψ_i 分别在 $[0, 2\pi)$ 和 $(-\pi/2, \pi/2)$ 上随机给定。期望球状围捕半径取 $R = 10$ m,仿真时间为 100 s。在仿真图中,空心三角形表示各 AUV 的初始位置,实心三角形表示各 AUV 的最终位置,圆形和方形标记分别表示目标 T 的初始位置和最终位置。

本文的三维 AUV 动力学模型基于 Fossen 海洋航行器建模框架^[26]建立,其中质量、转动惯量及附加质量等参数参考 REMUS AUV 动力学模型^[27]。阻尼参数根据本文简化动力学模型进行等效设置,具体数值见表 1。

表 1 航行器模型参数

Tab. 1 Model parameters of AUV

参数	数值
质量 m/kg	30.48
偏航转动惯量 $I_z/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	3.45
俯仰转动惯量 $I_y/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	3.45
前进附加质量 X_i/kg	-0.93
偏航附加转动惯量 $N_{\dot{\omega}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	-4.88
俯仰附加转动惯量 $M_{\dot{\mu}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	-4.88
前进线性阻尼系数 $D_v/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	-1.62
前进二次阻尼系数 $D_{\dot{v}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1})$	-1.93
偏航线性阻尼系数 $D_{\dot{\omega}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$	-9.40
偏航二次阻尼系数 $D_{\omega\omega}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	-9.40
俯仰线性阻尼系数 $D_{\dot{\mu}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$	-9.40
俯仰二次阻尼系数 $D_{\mu\mu}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	-9.40

3.1 目标信息完全可得下的分布式围捕控制

首先考虑目标信息完全可得情况下运动目标围捕问题,用于验证所设计的围捕控制器在理想目标

观测条件下的有效性。仿真中设置 4 个 AUV(分别用 AUV1 ~ AUV4 表示)对运动目标进行协同围捕,所有 AUV 均能直接获得目标相对位置信息。目标初始位置为 $\boldsymbol{p}_T(0) = (2, 2, 0)$ m,目标速度为 $\boldsymbol{v}_T = (0.3, 0.2, 0.1)$ m/s。各 AUV 对应的切面圆半径、极角以及主要控制参数如表 2 所示,其中环绕角速度 Ω 的取值依据围捕循环追踪的稳态圆周运动关系确定^[28]。

表 2 目标信息完全可得情况下的控制器参数

Tab. 2 Controller parameters with target information

参数	AUV1	AUV2	AUV3	AUV4		
r_i/m	3.83	9.24	9.24	3.83		
ϕ_i/rad	0.39	1.18	1.96	2.75		
全局参数	N	R/m	k_e	δ/m	$\Omega/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	k_d
数值	4	10	2	0.5	0.9	10

图 4 为多 AUV 对运动目标的围捕轨迹。可以看到各 AUV 从随机初始位置出发后,能够逐渐接近目标周围的期望围捕区域,并随目标运动形成稳定的三维球状围捕轨迹。与此同时,各 AUV 在不同切面圆半径和不同相位上分布,说明所设计虚拟辅助系统能够引导 AUV 形成三维球状围捕构型。

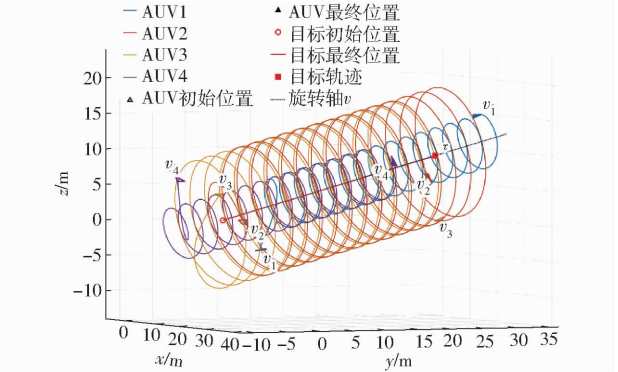


图 4 目标信息完全可得下三维运动目标围捕轨迹

Fig. 4 Three-dimensional trajectories of moving-target encirclement with full target information

图 5 给出了各个 AUV 的归一化前进速度 v_i/r_i 、偏航角速度 ω_i 、俯仰角速度 μ_i 以及俯仰角 ψ_i 随时间的变化过程。由图 5 可知,各 AUV 在初始阶段存在一定的瞬态调整,随后状态曲线逐渐进入稳定变化范围。说明控制器能够根据局部目标相对位置信息实时调整 AUV 的运动状态,使真实 AUV 跟踪虚拟辅助系统给出的期望相对位置。

图 6 为各 AUV 切面圆半径的跟踪结果,4 个 AUV 的期望面圆半径分别为 3.83、9.24、9.24、3.83 m。各 AUV 的切面圆半径经过短暂过渡后均收敛到对应期望值附近,说明 AUV 不仅能够保持与目标之间的期望空间距离,而且能够稳定分布在由空间极角 ϕ_i 决定的不同切面轨道上。

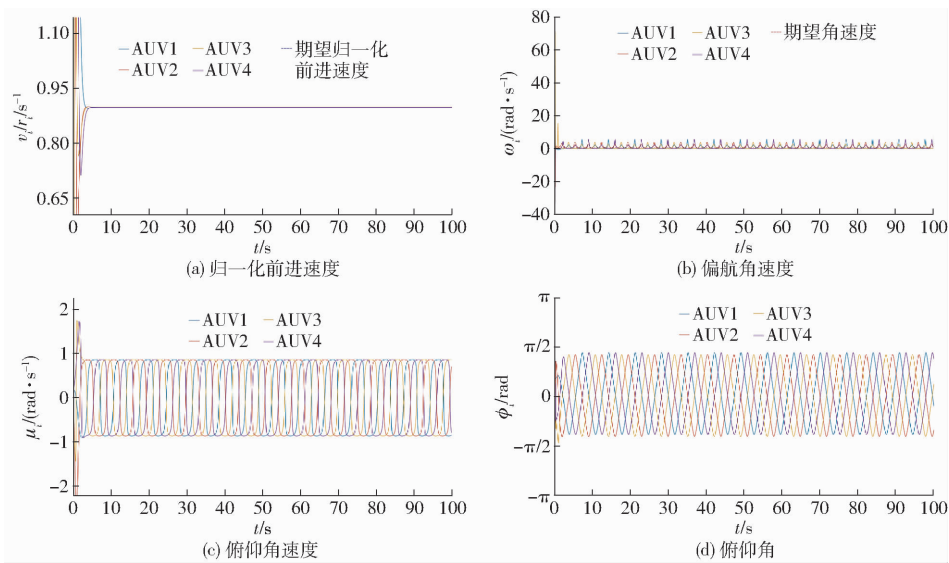


图 5 目标信息完全可得下 AUV 状态变化

Fig. 5 AUV state responses with target information

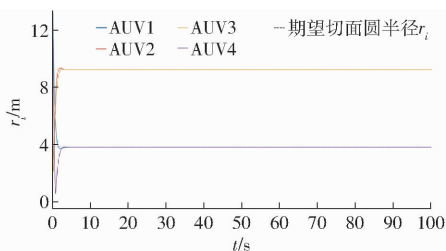


图 6 目标信息完全可得下切面圆半径跟踪结果

Fig. 6 Cross-sectional radius tracking with target information

图 7 展示了相邻 AUV 分离角的变化情况,其在初始阶段存在波动,随后逐渐趋近于期望分离角 $Y_i = 2\pi/N = \pi/2$,表明各 AUV 在目标周围能够保持稳定的相对角度关系。

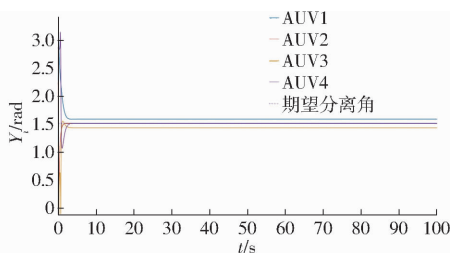


图 7 目标信息完全可得下相邻 AUV 分离角变化曲线

Fig. 7 Separation angles between adjacent AUVs with target

图 4~7 的结果表明,在目标信息完全可得情况下,本文所设计的分布式三维球状围捕控制器能够引导多 AUV 从随机初始状态出发,逐渐收敛到运动目标周围的期望围捕区域,并保持稳定的切面圆半径和相邻分离角,成功实现了预期编队。

3.2 目标信息部分缺失下的分布式围捕控制

进一步考虑目标信息部分缺失情况下的运动目标围捕问题,用于验证所设计分布式三维球状围捕控制器与 RPVE 估计器结合后的有效性。AUV 的数量 N 增加为 5 个,其中 AUV1 和 AUV5 能够直接

获得目标相对位置信息,AUV2、AUV3 和 AUV4 无法直接观测目标,需要通过 RPVE 获取目标位置信息。

RPVE 估计器参数取 $\gamma_1 = 10$ 、 $\gamma_2 = 5$,局部误差反馈增益取 $k_e = 8$,虚拟辅助系统环绕角速度取 $\Omega = 0.618 \text{ rad/s}$,除此之外其余仿真设置与 3.1 节一致。不同的是,目标运动形式由匀速直线运动扩展为三维曲线运动,其运动轨迹设置为

$$\begin{cases} x_T(t) = 2 + 0.15t \\ y_T(t) = 2 + 4\sin(0.018t) \\ z_T(t) = 1.5(1 - \cos(0.018t)) \end{cases} \quad (60)$$

由式(60)可得,目标速度分量为

$$\begin{cases} v_x(t) = 0.15 \\ v_y(t) = 0.072\cos(0.018t) \\ v_z(t) = 0.027\sin(0.018t) \end{cases} \quad (61)$$

图 8 展示了在 $t \in [0, 100] \text{ s}$ 期间,多 AUV 运动轨迹的三维视图、俯视图和侧视图。可以看出,在仅部分 AUV 能够直接获得目标信息的情况下,所有 AUV 仍能够从随曲线运动目标形成稳定的三维围捕轨迹。

图 9 是 RPVE 目标位置估计误差随时间变化的结果。各 AUV 的目标位置估计误差在初始阶段快速下降,并在约 7 s 内收敛到零附近。其中,能够直接观测目标的 AUV1 和 AUV5 估计误差下降更快,目标不可见的 AUV2、AUV3 和 AUV4 也能在邻居信息作用下逐渐获得准确的目标位置估计。该结果表明,在有向环通信拓扑中,只要部分 AUV 能够直接获得目标信息,RPVE 即可通过邻居信息传递实现目标位置估计误差的快速收敛,从而为目标不可见 AUV 围捕控制提供有效输入。

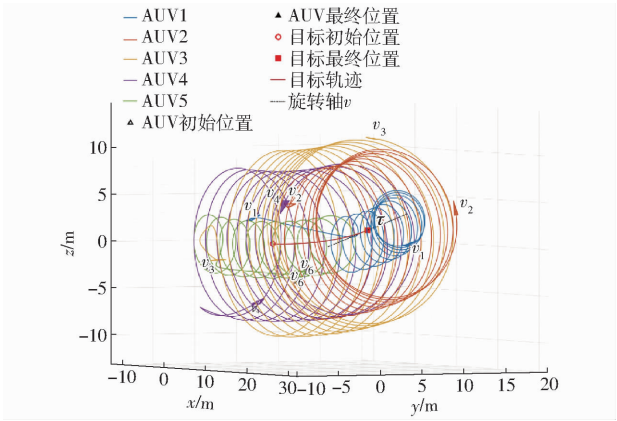


图 8 目标信息部分缺失下三维运动目标围捕轨迹

Fig. 8 Three-dimensional trajectories under partial target-information loss

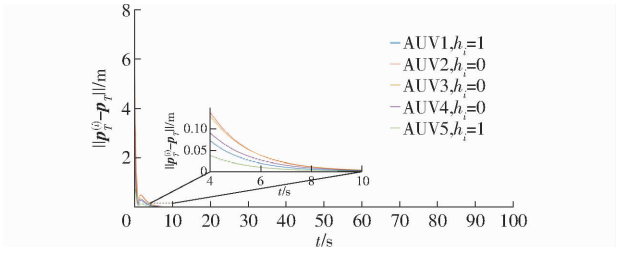


图 9 RPVE 目标位置估计误差

Fig. 9 Target-position estimation errors of RPVE

图 10、11 给出了目标信息部分缺失情况下环绕队形的保持结果。由图 10 可见,AUV1 ~ AUV5 的切面圆半径分别收敛到约 3.05、8.07、9.99、8.07、3.05 m,与期望值基本一致;由图 11 可见,相邻 AUV 分离角经过短暂调整后均逐渐收敛到期望值 $Y_i = 2\pi/N \approx 1.26$ rad 附近。上述结果表明在部分 AUV 依赖 RPVE 获取目标信息的情况下,所设计控制器仍能同时保持各 AUV 的相对位置和角度关系,从而维持稳定的三维球状围捕构型。

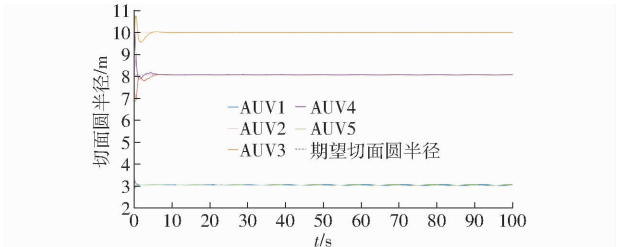


图 10 目标信息部分缺失下切面圆半径跟踪结果

Fig. 10 Cross-sectional radius tracking under partial target-information loss

为验证所提方法在非理想水下环境中的鲁棒性,在目标信息部分缺失仿真的基础上,进一步引入水声弱通信和测量噪声。考虑到本文交换的信息主要为相邻 AUV 间的小数据量状态信息,设置各 AUV 在围捕过程中每秒与相邻 AUV 通信一次;同时,第 i 个 AUV 获得的目标相对位置信息和邻居相对位置信息均受到零均值高斯白噪声影响,即

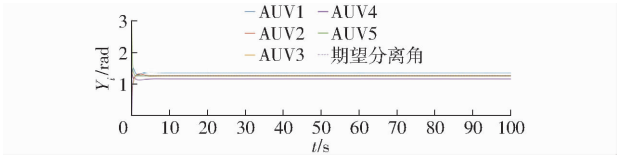


图 11 目标信息部分缺失下相邻 AUV 分离角变化曲线

Fig. 11 Separation angles between adjacent AUVs under partial target-information loss

$$\begin{cases} \check{\mu}_0^{(i)} = \bar{\mu}_0^{(i)} + \epsilon_0^{(i)} \\ \check{\mu}_+^{(i)} = \mu_+^{(i)} + \epsilon_+^{(i)} \end{cases} \quad (62)$$

式中 $\check{\mu}_0^{(i)}$ ——加入噪声后的目标相对位置信息

$\check{\mu}_+^{(i)}$ ——加入噪声后的邻居相对位置信息

$\epsilon_0^{(i)}$ ——目标相对位置测量噪声

$\epsilon_+^{(i)}$ ——邻居相对位置测量噪声

其中 $\epsilon_0^{(i)} \sim N(\mathbf{O}_{3 \times 1}, \Sigma_0)$, $\epsilon_+^{(i)} \sim N(\mathbf{O}_{3 \times 1}, \Sigma_+)$; $\mathbf{O}_{3 \times 1}$ 为零向量, Σ_0 和 Σ_+ 为协方差矩阵,分别设定为

$$\begin{cases} \Sigma_0 = \sigma_0^2 \mathbf{I}_3 \\ \Sigma_+ = \sigma_+^2 \mathbf{I}_3 \end{cases} \quad (63)$$

式中 σ_0 ——目标相对位置测量噪声标准差

σ_+ ——邻居相对位置测量噪声标准差

$\mathbf{I}_3$ ——3 阶单位矩阵

参考已有水声弱通信与测量噪声设置^[13],并结合短距离水声定位系统实测的三维定位误差^[29],本文设置 $\sigma_0 = 0.20$ m, $\sigma_+ = 0.10$ m。其中, $\sigma_0 > \sigma_+$ 用于体现目标观测相较于相邻 AUV 协同相对定位具有更强的不确定性。

图 12、13 为弱通信与测量噪声共同作用下的仿真结果。由图 12 可见,所有 AUV 仍能够随三维曲线运动目标形成稳定的球状围捕轨迹;由图 13 可见,RPVE 目标位置估计误差在初始阶段快速下降,并在稳态阶段保持有界锯齿状波动。其原因是弱通信条件下邻居信息周期性更新,使误差在通信间隔内累积、在信息更新后减小;同时测量噪声引起小幅随机波动。

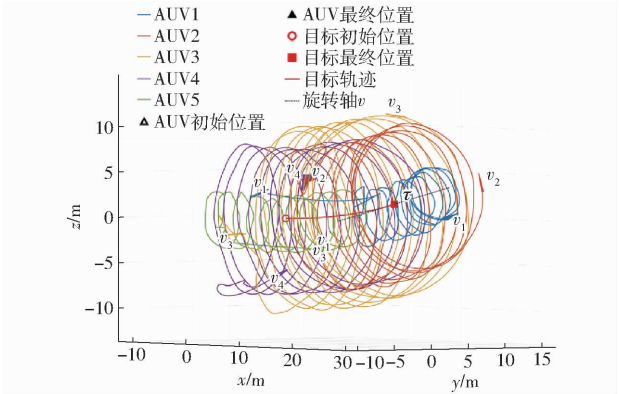


图 12 弱通信与测量噪声下三维运动目标围捕轨迹

Fig. 12 Three-dimensional trajectories under weak communication and measurement noise

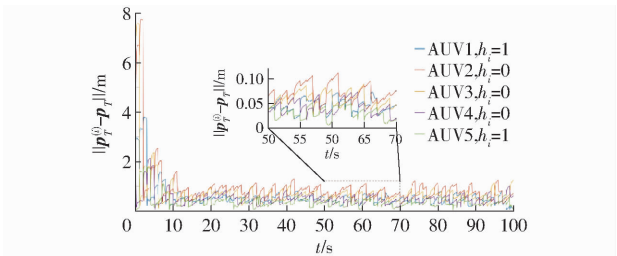


图 13 弱通信与测量噪声条件下 RPVE 目标位置估计误差
Fig. 13 RPVE target position estimation errors under weak communication and measurement noise

综上所述表明,在目标信息部分缺失且目标做三维曲线运动的情况下,RPVE 能够有效估计目标位置信息,并为目标不可见 AUV 提供控制所需的目标相对信息。进一步考虑弱通信和测量噪声后,RPVE 估计误差虽存在有界波动,但仍能保持有效估计;所设计分布式三维球状围捕控制器能够使多 AUV 稳定收敛到目标周围的期望切面圆轨道,并保持相邻 AUV 之间的分离角接近期望值,从而形成稳定的三维球状围捕队形。

4 结论

(1)针对信息受限条件下多 AUV 在三维空间

下对运动目标的围捕问题,提出一种结合 RPVE 估计器、虚拟辅助系统和分布式围捕控制器的控制方法。该方法利用局部相对位置测量和有向环通信实现目标状态估计与围捕控制。

(2)通过引入 RPVE,目标不可见 AUV 能够在有向环拓扑中借助邻居信息交换获得目标位置估计;通过构造以目标运动方向为旋转轴的虚拟辅助系统,多 AUV 对运动目标周围形成稳定的三维球状围捕构型。在此基础上,分别设计了运动学围捕控制器和动力学速度跟踪控制器,并通过稳定性分析证明了局部跟踪误差的指数收敛性以及扰动条件下闭环系统的最终有界性。

(3)仿真结果表明,在目标信息完全可得条件下,多 AUV 能够从随机初始状态收敛到运动目标周围的期望球状围捕区域;在目标信息部分缺失且目标做三维曲线运动的情况下,RPVE 能够有效补偿目标不可见 AUV 的信息缺失,使系统保持稳定的切面圆半径和相邻分离角。进一步考虑弱通信和测量噪声后,RPVE 估计误差仍保持有界,多 AUV 仍能维持稳定的三维球状围捕队形,从而实现对运动目标的三维球状围捕。

参 考 文 献

[1] 周焕银,朱睿鹏,刘金生. 渔业水下机器人研究综述[J]. 农业机械学报, 2025, 56(10): 20–35.
Zhou Huanyin, Zhu Ruipeng, Liu Jinsheng. Research review on underwater robotics in fisheries[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(10): 20–35. (in Chinese)

[2] 李亚南. 面向水下无线传感器网络数据采集的多 AUV 路径规划研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2025.
Li Yanan. Research on multi-AUV path planning for data collection in underwater wireless sensor networks[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2025. (in Chinese)

[3] 王乃新. 多 AUV 面向围捕任务的协同规划与控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2024.
Wang Naixin. Research on cooperative planning and control methods for multiple AUVs in encirclement tasks[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2024. (in Chinese)

[4] 张佳欣. 面向海洋环境监测的自主水下航行器路径规划技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2024.
Zhang Jiaxin. Path planning technology for autonomous underwater vehicles in marine environmental monitoring[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2024. (in Chinese)

[5] Lu K, Dai S L, Jin X. Adaptive angle-constrained enclosing control for multirobot systems using bearing measurements[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2024, 69(2): 1324–1331.

[6] 张雨. 面向集结和回坞阶段的 AUV 集群回收控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
Zhang Yu. Research on AUV swarm recovery control method for rendezvous and homing phases[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2023. (in Chinese)

[7] Zhang X Z, Yang Q K, Xiao F, et al. Linear formation control of multi-agent systems[J]. Automatica, 2025, 171: 111935.

[8] Smith T K. Virtual structures based autonomous formation flying control for small satellites[D]. Logan: Utah State University, 2023.

[9] Cai W, Ju Y, Liu Z, et al. Event-triggered leader-follower communication based formation control with dual-predictor for multiple AUVs[J]. Ocean Engineering, 2025, 334: 121552.

[10] Zhang D, Chen H L, Lu Q, et al. Finite-time cooperative output regulation of heterogeneous nonlinear multi-agent systems under switching DoS attacks[J]. Automatica, 2025, 173: 112062.

[11] Yang W L, Shi Z Y, Zhong Y S. Distributed robust adaptive formation control of multi-agent systems with heterogeneous uncertainties and directed graphs[J]. Automatica, 2023, 157: 111275.

[12] Wang J, Ma B L, Yan K. Target circumnavigation of mobile robots using range-only measurements[J]. Automatica, 2024, 159: 111386.

[13] 施琳琳. 多自主水下航行器的协同流场估计与分布式目标围捕[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
Shi Linlin. Cooperative flow-field estimation and distributed target encirclement for multiple autonomous underwater vehicles [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022. (in Chinese)

[14] 孙志远. 无人艇集群协同围捕策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
Sun Zhiyuan. Research on cooperative encirclement strategies for unmanned surface vehicle swarms [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2023. (in Chinese)

[15] Zou Y, Zhong L Y, He W, et al. Leader-follower circumnavigation control of non-holonomic robots using distance-related information[J]. Automatica, 2024, 169: 111831.

[16] Shi L L, Zheng R H, Liu M Q, et al. Distributed circumnavigation control of autonomous underwater vehicles based on local information[J]. Systems & Control Letters, 2021, 148: 104873.

[17] Hu B B, Zhou Y X, Wei H L, et al. Ordering-flexible multi-robot coordination for moving target convoying using long-term task execution[J]. Automatica, 2024, 163: 111558.

[18] Hu B B, Zhang H T, Shi Y. Cooperative label-free moving target fencing for second-order multi-agent systems with rigid formation[J]. Automatica, 2023, 148: 110788.

[19] 龙承启. 复杂条件下无人水下航行器轨迹跟踪与编队控制研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2024.
Long Chengqi. Research on trajectory tracking and formation control of unmanned underwater vehicles under complex conditions [D]. Changsha: Hunan University, 2024. (in Chinese)

[20] 李邦帅. 基于 SDRE 方法的欠驱动 AUV 轨迹跟踪控制研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2024.
Li Bangshuai. Research on trajectory tracking control of underactuated AUVs based on the SDRE method [D]. Changsha: Hunan University, 2024. (in Chinese)

[21] Zhang L, Lu M B, Deng F, et al. Distributed state estimation under jointly connected switching networks: continuous-time linear systems and discrete-time linear systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2024, 69(2): 1104 – 1111.

[22] Wang L L, Liu J, Anderson B D O, et al. Split-spectrum based distributed state estimation for linear systems [J]. Automatica, 2024, 161: 111421.

[23] Liu F, Yuan S H, Nguyen T M, et al. Aerial target encirclement and interception with noisy range observations [J]. Automatica, 2026, 183: 112600.

[24] Fang X, Xie L H, Dimarogonas D V. Simultaneous distributed localization and formation tracking control via matrix-weighted position constraints[J]. Automatica, 2025, 175: 112188.

[25] Jacinto M, Trindade P, Rego F F C, et al. Distributed consensus-based observer design for target state estimation with bearing measurements[J]. Automatica, 2026, 189: 113031.

[26] Fossen T I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control[M]. John Wiley & Sons, 2011.

[27] Prestero T. Verification of a six-degree of freedom simulation model for the REMUs autonomous underwater vehicle [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology/Woods Hole Oceanographic Institution, 2001.

[28] Shi L, Wu H, Wei B, et al. Distributed three-dimensional target enclosing control for AUVs under ocean currents[J]. Ocean Engineering, 2026, 358: 125700.

[29] Zhu Y, Qian Z, Yang S, et al. Sparse deconvolution beamforming for compact AUV-mounted passive inverted ultra-short baseline systems[J]. Ocean Engineering, 2026, 343: 123373.