

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201709067

海洋环境下欠驱动无人艇航迹跟踪控制算法

陈 霄,刘 忠,罗亚松,王 潋,董 蛟

(中国人民解放军海军工程大学 兵器工程学院,武汉 430000)

摘 要: 为提高风浪流等外界环境扰动下,欠驱动无人艇航迹跟踪控制的准确性和鲁棒性,研究真实海洋环境下一类欠驱动无人艇的航迹跟踪控制问题,提出了一种基于改进视线导引算法与自适应滑模航向控制算法级联形式的欠驱动无人艇航迹跟踪控制算法,并基于李雅普诺夫理论和级联系统理论证明了当所有控制目标实现时,航迹跟踪控制系统为一致全局渐近稳定的. 与传统的视线导引算法相比,改进的导引算法通过引入自适应观测器能够实现对漂角的实时估计和补偿,同时时变前视距离的设计使得无人艇的操纵更加灵活. 以“海鲟 03 号”无人艇操纵运动模型和辨识得到的参数为基础,在 MATLAB/SIMULINK 软件上进行了航迹跟踪对比仿真实验,仿真结果表明:相比传统 LOS 导引策略下的航迹跟踪算法,控制算法动态性能更高且稳态误差较小,验证了算法的有效性和先进性;利用“海鲟 03 号”无人艇对所提出的控制算法进行了海上试验,结果表明在航迹跟踪控制算法的作用下,无人艇能较为准确地跟踪预先设定的期望航迹,且在整个航迹跟踪过程中,航迹误差相对较小,验证了该算法在实际工程应用中的正确性和有效性.

关键词: 欠驱动控制;无人艇;视线导引;航迹跟踪;稳定性分析

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2018)10-0110-08

Path tracking control algorithm for the underactuated USV in the marine environment

CHEN Xiao, LIU Zhong, LUO Yasong, WANG Lian, DONG Jiao

(School of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430000, China)

Abstract: A path tracking control algorithm based on the improved line-of-sight guidance algorithm and adaptive sliding-mode heading control algorithm is proposed. Based on the Lyapunov and cascade theory, the proposed path tracking control system is proved to be uniform globally asymptotic stable (UGAS) when the target tasks are all achieved. Compared to the traditional line-of-sight guidance algorithm, the improved guidance algorithm in the paper can realize the real-time estimation and compensation of the drift angle by introducing the adaptive observer. At the same time, the design of the forward-looking distance makes the manipulation of the underactuated USV more flexible. Based on the maneuvering model and parameters identification of the USV called “sturgeon 03”, the path tracking contrast simulations were carried out on MATLAB/SIMULINK software. The simulation results show that the path tracking algorithm proposed in the paper has more dynamic performance and less steady-state error than the traditional LOS guidance algorithm. Then, the sea-field test using the USV called “sturgeon 03” confirms that, under the action of the tracking control algorithm, the USV can track the desired path accurately, and the track error is relatively small during the whole tracking.

Keywords: underactuated control; unmanned surface vehicles; line-of-sight; path tracking; stability analysis

无人水面艇(unmanned surface vehicle, USV)作为一种小型水面智能任务平台,在海洋环境监测、海洋资源勘探以及现代化军事作战、维护海域安全等方面具有广阔的应用前景^[1-2],已成为国内外无人装备领域研究的热点. 目前,国外已有较多无人艇的实际应用,美国海军已装备包括近海港口级、远海舰队级以及多用途无人艇,以色列海军舰队也装备有不同作战用途的无人艇. 相比国外,中国无人艇的研

究开展较晚,应用实例较少. 中国针对无人艇总体设计和智能控制开展相关研究的单位主要有海军工程大学、江苏科技大学、上海大学等院校和一些舰船研究所. 航迹跟踪作为 USV 安全航行和完成各项使命任务的前提,同时也是 USV 智能控制的关键技术之一^[3-4]. 不具有侧向推进器或侧向推进器在高速航行时失效的 USV 是一类典型的欠驱动系统,由于控制输入个数少于其所需控制的自由度个数,故该类系统存在不可积的加速度约束,具有一定的复杂性^[5-6].

视线导引(line-of-sight, LOS)算法^[7]作为一种

收稿日期: 2017-09-13
作者简介: 陈 霄(1990—),男,博士研究生;
刘 忠(1963—),男,教授,博士生导师
通信作者: 刘 忠,15623115746@163.com

经典有效的导引策略,其原理独立于动力学控制,不依赖于任何模型,对高频白噪声敏感度低,且需要设计的参数少,期望航向的获取只与船舶的实时位置和给定的期望航线有关,能够实时高效地计算期望航向并传递给控制层,因而被广泛应用于船舶的航迹跟踪控制. 田勇等^[8]利用视线导引算法和抗饱和 PID 控制算法实现了直线航迹跟踪控制器的设计,通过湖上试验验证了算法的有效性,但并未考虑外界扰动的影响. Oh 等^[9]将 LOS 导引策略与模型预测控制算法相结合,设计了一种无人艇航迹跟踪控制算法,并通过仿真实验验证了算法的有效性. Fossen 等^[10]提出了一种自适应积分 LOS 制导算法,与 PID 航向控制器共同作用,实现了水面船舶航迹跟踪控制系统的设计,并证明了在平衡点处,控制系统是一致半全局指数稳定的. Caharija 等^[11]提出了一种基于 ILOS 导引算法和动态反馈控制的航迹跟踪算法,证明了控制系统是全局 k -指数稳定的,并通过直线航迹跟踪仿真试验验证了算法的有效性. 此外,鲁棒自适应控制^[12]、模糊神经网络控制^[13]以及非线性控制^[14]等为航迹跟踪控制算法的研究提供了参考.

虽然目前国内外对于欠驱动 USV 航迹跟踪控制取得了一定的研究成果,但大多仍处于仿真验证或实验室半物理仿真阶段,实际应用的实例比较少见. 因此,本文针对真实海洋环境下无人艇的航迹跟踪问题,采用理论研究、仿真分析和试验验证相结合的方法,首先以“海鲟 03 号”无人艇操纵运动模型和辨识得到的参数为基础,提出了一种基于改进视线导引算法与自适应滑模航向控制算法级联形式的欠驱动无人艇航迹跟踪控制算法,并基于李雅普诺夫理论证明了当所有控制目标实现时,控制系统为一致全局渐近稳定的. 同时,航迹跟踪对比仿真实验,验证了算法的有效性和先进性. 最后,利用“海鲟 03 号”无人艇对所提出的控制算法进行了海上试验,验证了该算法在实际工程应用中的正确性和有效性.

1 问题描述

1.1 USV 数学模型

“海鲟”号系列无人艇是海军工程大学自主研发的一款具有遥控、半自主和全自主控制的多功能智能无人水面航行器,如图 1 所示. “海鲟 03”号无人艇长 7.0 m,宽 2.05 m,喷水推进、最高航速 35 节,采用模块化设计思想,可搭载有效载荷 900 kg,续航能力为 15 h (15 节),搭载有姿态方位组合导航、光电设备、无线通信设备、先进的雷达及武器系

统等,配备自主开发的无人艇载中央控制系统和地面站遥测控制系统等,可与地面站(母舰)指挥控制中心协同配合,通过搭载不同的任务模块满足不同的任务需求.



图 1 “海鲟 03”号无人艇

Fig. 1 “Sturgeon 03” USV

“海鲟 03”号 USV 的运动学模型如下:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= u \cos(\psi) - v \sin(\psi), \\ \dot{y} &= u \sin(\psi) + v \cos(\psi), \\ \dot{\psi} &= r.\end{aligned}\quad (1)$$

式中: x 、 y 、 ψ 分别为惯性坐标系 $\{i\}$ 下 USV 在水平面的位置和艏向角; u 、 v 、 r 分别为 USV 在船体坐标系 $\{b\}$ 中的纵向、横向线速度及艏向角速度.

“海鲟 03”号 USV 的动力学模型如下

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v}) = \mathbf{B}\mathbf{f}.$$

式中: $\mathbf{v} = [u, v, r]^T$, $\mathbf{M}$ 为欠驱动 USV 的惯性参数矩阵; $\mathbf{C}(\mathbf{v})$ 为科里奥利/向心力矩阵; $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ 为阻尼参数矩阵, $\mathbf{D}(\mathbf{v}) \neq \mathbf{D}^T(\mathbf{v})$, $\mathbf{D}(\mathbf{v}) > 0$; $\mathbf{f} = [T_u, T_r]^T$ 为控制输入矩阵, 其中 T_u 为前进推力, T_r 为偏航力矩; 矢量矩阵 $\mathbf{B}$ 为控制输入配置矩阵, 作用是将控制输入映射成作用到艇体上相应的力及力矩. 通常, 矩阵 $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ 、 $\mathbf{C}(\mathbf{v})$ 、 $\mathbf{B}$ 有如下结构:

$$\begin{aligned}\mathbf{M} &= \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D}(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{C}(\mathbf{v}) &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m_{22}v \\ 0 & 0 & m_{11}u \\ m_{22}v & -m_{11}u & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & b_{22} \\ 0 & b_{32} \end{bmatrix}.\end{aligned}$$

1.2 航迹跟踪问题描述

欠驱动 USV 水平面的航迹跟踪问题可分为两个子问题^[15]: 1) 动力学问题, 即设计纵向控制律 T_u 使得 USV 保持期望的纵向速度; 2) 几何学问题, 即设计艏向控制律 T_r 使得 USV 的位置收敛到参考路径上. 因此, 本文所研究的航迹跟踪问题可描述为: 在海流等外界扰动存在的情况下, 设计导引策略和航向控制算法, 使得从任意初始位置和任意初始状态下出发的 USV 以期望纵向速度 u_d 前进, 最终使

USV 能够沿期望的航迹航行,此时其横向误差收敛到 0. 因此控制目标可表示为:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y_e = (y - y_d) = 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} u_e = (u - u_d) = 0.$$

2 航迹跟踪控制系统的设计

本文设计的航迹跟踪控制系统采用 LOS 导引子系统与航向控制子系统级联的形式. 导引子系统根据 USV 实时的位置、姿态以及期望航线的信息, 求解出期望的 USV 航向,而航向控制子系统则根据导引子系统给定的期望信号和 USV 当前的运动信息求解出期望的舵机操纵信号,以此使得 USV 航迹跟踪的位置和航向能够渐进收敛到平衡位置,同时

航速控制子系统作为一个单独的负反馈回路实现 USV 对期望速度的跟踪.

2.1 航迹跟踪控制系统设计

航迹跟踪控制系统设计框图如图 2 所示,LOS 导引算法利用从导航系统获取的无人艇当前位置信息 $(x(t), y(t))$ 和期望路径点 (x_d, y_d) 信息,实时计算 USV 当前位置与期望航迹之间的横向误差 $y_e(t)$, 并将其映射到指令艏向角 ψ_d , 然后设计航向控制器跟踪 ψ_d , 在航向控制子系统的作用下最终间接消除 USV 与参考航迹之间的横向误差,实现对期望航线的跟踪. 可以看出,级联的设计方法使得航迹跟踪控制系统的结构清晰,物理意义明确,便于控制器设计和稳定性分析.

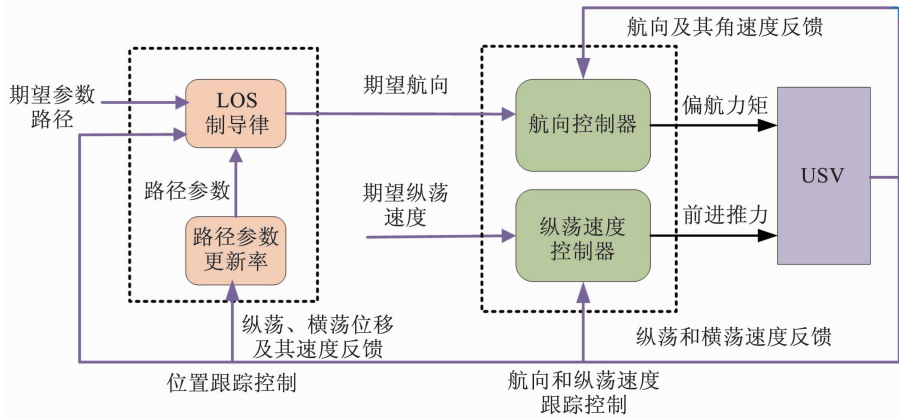


图 2 航迹跟踪控制系统设计框图

Fig. 2 Design block diagram of the path tracking control system

2.2 LOS 导引子系统

LOS 导引算法是一种经典有效的导航算法,文献[7]中给出了船舶运动控制领域中 LOS 导引算法的定义:LOS 矢量是船舶当前位置在期望航路投影点的切线上一点与当前船舶位置的连线. 通过控制船舶合速度的方向始终对准 LOS 矢量,引导船舶逼近期望航路. LOS 导引原理独立于动力学控制,不依赖于任何数学模型,需要设计的参数少,且对高频白噪声不敏感,期望航向的获取只与给定的期望航路和船舶的实时位置有关,能够实时高效地计算期望航向并传递给控制层. LOS 导引算法可分为基于前视距离和包围圈两种,本文采用基于前视距离的 LOS 导引算法,如图 3 所示,以 USV 当前位置 $(x(t), y(t))$ 在参考路径上的投影点 $(x_d(\omega), y_d(\omega))$ 为原点建立 Serret-Frenet 坐标系,其中 ω 为路径参数变量. 该坐标系的纵轴 X_p 沿参考路径的切线方向,横轴 Y_p 沿参考路径的法线方向并指向右侧,且纵轴 X_p 与惯性坐标系纵轴间的夹角记为路径方位角为

$$\psi_p(\omega) = \arctan\left(\frac{y'_d(\omega)}{x'_d(\omega)}\right) \in [-\pi, \pi]. \quad (2)$$

式中: $y'_d(\omega) = \frac{dy_d(\omega)}{d\omega}$, $x'_d(\omega) = \frac{dx_d(\omega)}{d\omega}$.

路径参数变量的变化率满足:

$$\dot{\omega} = \frac{U}{\sqrt{x'^2_d(\omega) + y'^2_d(\omega)}} > 0,$$

式中, $U = \sqrt{u^2 + v^2} \geq 0$ 为 USV 的航行速度. 称点 (x_{los}, y_{los}) 与 Serret-Frenet 坐标系原点间的距离为前视距离 Δ , $\Delta = nL$, $n \geq 1$, L 为艇长.

传统的 LOS 导引算法^[7]如下

$$\chi_{los} = \psi_p(\omega) + \arctan\left(-\frac{y_e(t)}{\Delta}\right),$$

式中, χ_{los} 为期望的航迹角. 故期望艏向角为

$$\psi_d = \chi_{los} - \beta = \psi_p(\omega) + \arctan\left(-\frac{y_e(t)}{\Delta}\right) - \beta,$$

式中, β 为由于无人艇在真实海洋环境中航行时,其实际航迹跟踪过程中会受到海流等外界干扰的影响,从而会导致无人艇的航迹角 χ 与其艏向角 ψ 之间存在夹角,即漂角.

其中:

$$\begin{aligned}\varphi_1(y_e(t), \tilde{\psi}) &= \frac{\sin \tilde{\psi}}{\tilde{\psi}} \cos(\psi_d - \psi_p(\omega)) + \\ &\quad \frac{\cos \tilde{\psi} - 1}{\tilde{\psi}} \sin(\psi_d - \psi_p(\omega)), \\ \varphi_2(y_e(t), \tilde{\psi}) &= -\frac{\sin \tilde{\psi}}{\tilde{\psi}} \sin(\psi_d - \psi_p(\omega)) + \\ &\quad \frac{\cos \tilde{\psi} - 1}{\tilde{\psi}} \cos(\psi_d - \psi_p(\omega)).\end{aligned}$$

由高等数学知识可知, $|(\cos \tilde{\psi} - 1)/\tilde{\psi}| \leq 0.73$, $|\sin \tilde{\psi}/\tilde{\psi}| \leq 1$, $|\cos(\psi_d - \gamma_p(\theta))| \leq 1$, $|\sin(\psi_d - \gamma_p(\theta))| \leq 1$.

因此, 函数 $\varphi_1(y_e(t), \tilde{\psi})$ 、 $\varphi_2(y_e(t), \tilde{\psi})$ 满足:

$$|\varphi_1(y_e(t), \tilde{\psi})| \leq 1.73, \quad |\varphi_2(y_e(t), \tilde{\psi})| \leq 1.73.$$

假定航向控制子系统能够准确地跟踪期望航向角 ψ_d , 取虚拟控制输入 $y_{\text{int}} = \hat{\beta}$ 且满足条件 1 时, 式(15)可改写为

$$\begin{aligned}\dot{y}_e(t) &= -\frac{U y_e(t)}{\sqrt{\Delta^2 + (y_e(t) + \Delta \hat{\beta})^2}} + \\ &\quad \frac{U \Delta}{\sqrt{\Delta^2 + (y_e(t) + \Delta \hat{\beta})^2}} \tilde{\beta}.\end{aligned}$$

取正定且径向无界的李雅普诺夫函数 V_1 为

$$V_1(y_e(t), t, \tilde{\beta}) = \frac{1}{2} y_e(t)^2 + \frac{1}{2k} \tilde{\beta}^2 > 0. \quad (16)$$

式中: $y_e(t) \neq 0$, $\tilde{\beta} \neq 0$ 且 $k > 0$.

对式(16)微分可得

$$\begin{aligned}\dot{V}_1(y_e(t), t, \tilde{\beta}) &= y_e(t) \dot{y}_e(t) + \\ &\quad \frac{1}{k} \tilde{\beta} \dot{\tilde{\beta}} = -\frac{U y_e(t)^2}{\sqrt{\Delta^2 + (y_e(t) + \Delta \hat{\beta})^2}} + \\ &\quad \left(\frac{U \Delta y_e(t)}{\sqrt{\Delta^2 + (y_e(t) + \Delta \hat{\beta})^2}} + \frac{1}{k} \dot{\tilde{\beta}} \right).\end{aligned} \quad (17)$$

由于 $\dot{\tilde{\beta}} = -\dot{\beta}$, 将式(4)代入式(17)中可得

$$\dot{V}_1(y_e(t), t, \tilde{\beta}) = -\frac{U y_e(t)^2}{\sqrt{\Delta^2 + (y_e(t) + \Delta \hat{\beta})^2}} \leq 0.$$

因此, 在平衡点 $y_e(t) = 0$ 处, 导引子系统是一致全局渐近稳定的 (uniform global asymptotic stability, UGAS).

2.3 航向控制子系统

通常情况下, 设计航向控制器时, 船舶水平面内的运动数学模型通常采用 Nomoto 模型, 但是该模型是在低频小舵角的假设条件下进行推导的, 而无人

艇有着更快的航速和更好的机动性, 通常需要高频操舵, 因此 Nomoto 模型不适用于无人艇. 本文在考虑无人艇特性以及模型非线性基础上, 采用 Norrbins 模型来进行航向控制器的设计:

$$T\dot{\psi} + H_N(\psi) = K\delta,$$

$$H_N(\psi) = n_3 \dot{\psi}^3 + n_2 \dot{\psi}^2 + n_1 \dot{\psi} + n_0. \quad (18)$$

式中: ψ 为航向角; δ 为舵角输入; T 为时间常数; K 为增益; $H_N(\psi)$ 为非线性项, 用于描述 USV 的操纵性能; n_0 、 n_1 、 n_2 、 n_3 分别为 Norrbins 系数, 当 USV 具有对称结构时, $n_0 = n_2 \approx 0$; 当 USV 具有直行特性时, $n_1 = 1$, 否则 $n_1 = -1$. 故式(18)可简化为

$$T\ddot{\psi} + n_3 \dot{\psi}^3 + \dot{\psi} = K\delta.$$

因此航向控制子系统 Σ_2 为:

$$\dot{r} = -\frac{n_3}{T} r^3 - \frac{1}{T} \dot{\psi} + \frac{K}{T} \delta,$$

$$\dot{\psi} = r.$$

无人艇艏向控制目标为

$$\psi = \psi_d = \psi_p(\omega) - \arctan\left(\frac{y_e(t)}{\Delta} + y_{\text{int}}\right), \quad (19)$$

因此,

$$r_d = \dot{\psi}_d = \dot{\psi}_p(\omega) - \frac{(\frac{y_e(t)}{\Delta} + \Delta y_{\text{int}})' \Delta^2}{\Delta^2 + (y_e(t) + \Delta y_{\text{int}})^2}.$$

定义一阶滑膜面为

$$s: = \bar{r} + \gamma \bar{\psi}.$$

式中: $\bar{\psi} = \psi - \psi_d$, $\bar{r} = r - r_d$.

选取李雅普诺夫函数 $V_2 = \frac{1}{2} s^2$, 并微分可得

$$\dot{V}_2 = s(-\frac{n_3}{T} r^3 - \frac{1}{T} r + \frac{K}{T} \delta - \dot{r}_d + \gamma \bar{r}). \quad (20)$$

因此艏向控制律为

$$T_r = \delta = \frac{T}{K} \left(\frac{n_3}{T} r^3 + \frac{1}{T} r + \dot{r}_d - \gamma \bar{r} - k_d s \right), \quad (21)$$

式中, $k_d > 0$ 为常值参数, 将式(20)代入式(21)可得

$$\dot{V}_2 = -k_d s^2 < 0.$$

因此, $s = 0$ (或 $\bar{r} = 0$ 且 $\bar{\psi} = 0$) 为航向控制子系统的平衡点且在该处系统 Σ_2 是一致全局渐近稳定的 (uniform global asymptotic stability, UGAS).

3 系统的稳定性分析

导引子系统与航向控制子系统一起构成无人艇航迹跟踪控制系统, 使无人艇从任意初始状态出发,

沿期望航迹运动, 横向误差 $y_e(t)$ 全局渐近收敛, 从而完成对期望航线的跟踪. 航向控制子系统通过航向跟踪误差 $\bar{\psi} = \varphi - \psi_d$ 影响导引子系统, 而导引子系统则通过参考信号 ψ_d 和出现在参考信号 r_d 中的 $y_e(t)$ 扰动航向控制子系统, 下面给出整个控制系统的稳定性分析. 无人艇航迹控制系统可表述为

$$\begin{cases} \dot{y}_e(t) = U \sin(\psi + \beta - \psi_p(\omega)), \\ \dot{\psi} = r, \\ \dot{r} = -\frac{n_3}{T} r^3 - \frac{1}{T} \dot{\psi} + \frac{K}{T} \delta. \end{cases} \quad (22)$$

定理 1 当无人艇能够准确地跟踪导引子系统给出的期望艏向角即满足式 (19) 且控制输入满足式 (21) 时, 系统 (22) 是全局渐近稳定的.

证明 选取正定且径向无界的李雅普诺夫函数为 $V_3 = \frac{1}{2} y_e(t)^2 + \frac{1}{2} s^2$, 对其求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &= y_e(t) \dot{y}_e(t) + s \dot{s} = \\ & y_e(t) U \sin(\psi + \beta - \psi_p(\omega)) + \\ & s(-\frac{n_3}{T} r^3 - \frac{1}{T} r + \frac{K}{T} \delta - \dot{r}_d + \gamma \bar{r}). \end{aligned} \quad (23)$$

将式 (19)、(21) 代入式 (23) 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &= y_e(t) U \sin(\beta - \arctan(\frac{y_e(t)}{\Delta} + y_{int})) + \\ & s(-\frac{n_3}{T} r^3 - \frac{1}{T} r + \frac{K}{T} \frac{T}{K} (\frac{n_3}{T} r^3 + \frac{1}{T} r + \\ & \dot{r}_d - \gamma \bar{r} - k_d s) - \dot{r}_d + \gamma \bar{r}) = \\ & y_e(t) U (\frac{\sin \beta \Delta}{\sqrt{\Delta^2 + (y_e(t) + \Delta y_{int})^2}} - \\ & \frac{\cos \beta (y_e(t) + \Delta y_{int})}{\sqrt{\Delta^2 + (y_e(t) + \Delta y_{int})^2}}) - k_d s^2. \end{aligned} \quad (24)$$

由条件 1 可知, 漂角 β 很小 (一般 $\beta < 5^\circ$), 即满足 $\sin \beta \approx \beta$, $\cos \beta \approx 1$, 且假定自适应观测器 (4) 可较为准确估计缓慢变化的漂角 β , 即 $y_{int} = \hat{\beta} \approx \beta$, 则式 (24) 可改写为

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &= y_e(t) U (\frac{\beta \Delta}{\sqrt{\Delta^2 + (y_e(t) + \Delta \beta)^2}} - \\ & \frac{(y_e(t) + \Delta \beta)}{\sqrt{\Delta^2 + (y_e(t) + \Delta \beta)^2}}) - k_d s^2 = \\ & - \frac{U y_e(t)^2}{\sqrt{\Delta^2 + (y_e(t) + \Delta \beta)^2}} - k_d s^2 < 0. \end{aligned}$$

因此控制系统 (22) 在其平衡点 $(y_e(t), s) = (0, 0)$ 处是一致全局渐近稳定的.

4 仿真验证及结果分析

为了验证算法的先进性和普适性, 选择期望航

迹为常见的曲线路径, 在 MATLAB 平台下将本文所设计的航迹跟踪控制算法 (算法 1) 和传统 LOS 导引策略下的航迹跟踪算法 (算法 2) 进行仿真实验对比. USV 在海上航行时, 风、浪的干扰作用最终将作用到对无人艇舵角控制的干扰, 即对其航向控制子系统的干扰, 因此本文通过在航向控制中添加功率谱密度为 0.1 的白噪声来进行模拟. 仿真过程中海流设置为: $U_c = 0.2$ m/s, $\psi_c = 30^\circ$; USV 的初始状态位置为 $x = 0$ m, $y = -15$ m, 初始航向设置为 $\psi = 90^\circ$, 航速设定为 10 节.

算法 1 中的参数设定如下: $\lambda = 4$, $k_i = 0.03$, $\rho = 5$, $\gamma = 4.2$, $\Delta_{\min} = 6$, $\Delta_{\max} = 16$; 算法 2 中的参数设定为: $\Delta = 6$, $\gamma = 5$. 仿真结果如图 4~7 所示.

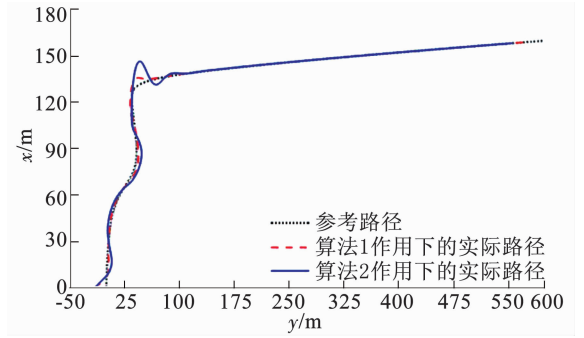


图 4 USV 曲线路径跟踪轨迹

Fig. 4 Curve path tracking of USV

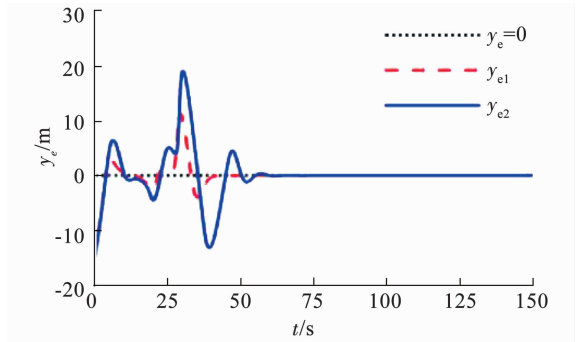


图 5 横向误差的变化

Fig. 5 Variation of cross-track error

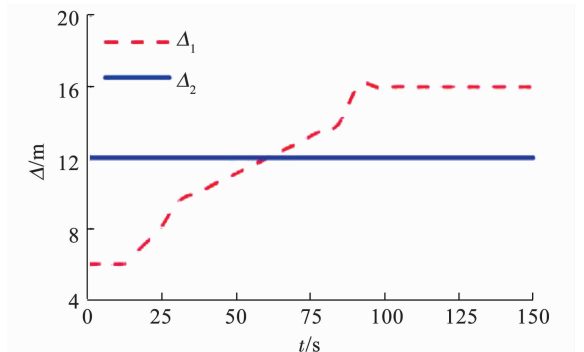


图 6 前视距离的变化

Fig. 6 Variation of lookahead distance

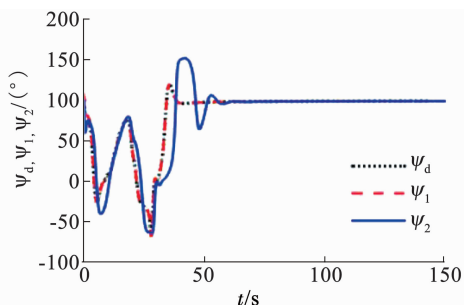


图 7 期望艏向角及艏向角的变化

Fig. 7 Variation of expected heading angle and actual heading angles

由图 4 可以看出,在算法 1 和算法 2 的单独作用下,USV 都能较为准确地跟踪给定的期望航迹,且在期望航迹为曲线段时,算法 1 的跟踪效果要明显优于算法 2;从图 5 可得,在算法 1 和算法 2 的单独作用下,USV 分别能够在 40、60 s 时收敛到期望航迹,在算法 1 的作用下,USV 航迹跟踪过程中超调较小(最大为 10 m),且运动轨迹相对平滑,而算法 2 存在较大超调行为(最大达 20 m),这是由于算法 1 中设计的时变前视距离能够使无人艇在距离期望航迹较远时,自适应选择较小的前视距离,从而快速逼近计划航线,而在距离期望航迹较近时,自适应选择较大的前视距离,从而能够控制无人艇平缓地靠近计划航线,这与图 6 中算法 1 的前视距离变化情况是一致的,因此时变前视距离的设计能够使 USV 的操纵性更加灵活。图 7 给出了航迹跟踪过程中无人艇的期望艏向角、算法 1 和算法 2 作用下 USV 艏向角的变化情况,可以看出,算法 1 的跟踪效果要明显优于算法 2,且艏向角跟踪曲线更为平滑。

5 实艇验证及结果分析

5.1 试验描述

海上实艇试验的任务区域为青岛至连云港之间某一海域,试验时,该海域的海洋环境条件为海况 2 级,风力 3 级,实艇试验过程如图 8 所示。试验中设定的期望航线为一平行四边形,航线总长度为 2 km,期望航速设定为 10 节,航迹中包括锐角和钝角转角,可检验无人艇控制算法在转弯处的跟踪性能。跟踪过程中,艇载控制子系统实时记录无人艇的位置、航向、风向风速、机舱温度、发动机状态、视频等实时信息,并通过无线通信信道实时发送给岸基(母舰)控制子系统,在显示设备上实时显示。

5.2 实艇验证结果与分析

根据航迹跟踪过程中数据库记录的试验数据,以经度为横坐标,以纬度为纵坐标,将 USV 的实际航行航迹与设定的跟踪期望航迹进行对比,如图 9 所示,start 和 end 分别为 USV 起点和终点,USV 逆时针航行。

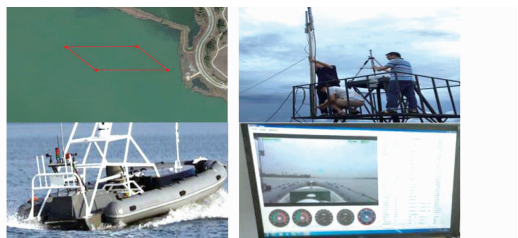


图 8 航迹跟踪实艇试验过程

Fig. 8 The real ship test process of path tracking

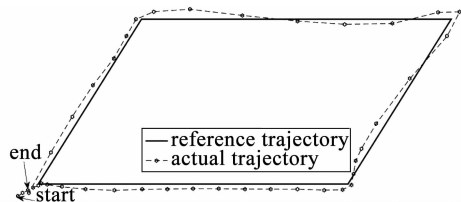


图 9 “海鲟 03”试验的航迹跟踪结果

Fig. 9 Test result of path tracking of “sturgeon 03” USV

从图 9 可以看出,在本文设计的航迹跟踪控制算法的作用下,无人艇能较为准确地跟踪预先设定的期望航迹,且在整个航迹跟踪过程中,航迹误差相对较小;由图 10 中横向误差曲线的变化情况可以看出,当无人艇航行至期望航迹的拐点处时,尤其是航向变化率较大的锐角拐点处,由于期望航迹的航向变化较为“猛烈”,导致无人艇的航迹跟踪误差较大,误差最大处约为 20 m,但是在本文航迹跟踪控制算法的作用下,能够使得无人艇较快地向着减小航迹误差的方向运动,并在短时间内使得无人艇的实际航迹收敛到期望航迹附近,从而保证了航迹跟踪控制的精度,同时也证明了该控制算法在实际工程应用中的有效性。

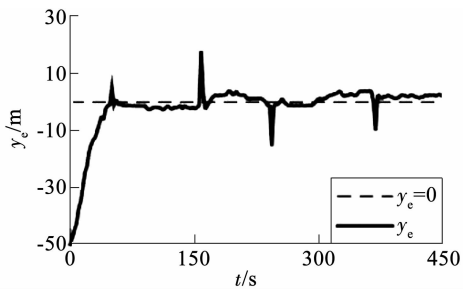


图 10 横向误差的变化

Fig. 10 Varying of cross-track error

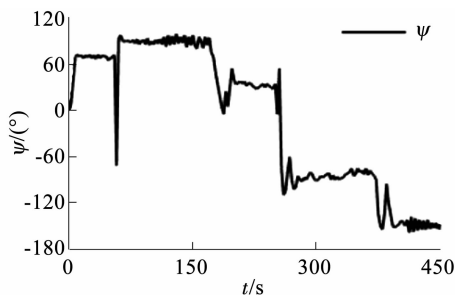


图 11 航向角的变化

Fig. 11 Varying of course degree

6 结 论

1) 研究真实海洋环境下一类欠驱动无人艇的航迹跟踪控制问题,提出了一种基于改进视线导引算法与自适应滑模航向控制算法级联形式的欠驱动无人艇航迹跟踪控制算法。

2) 基于李雅普诺夫理论和级联系统理论证明了当所有控制目标实现时,本文所提出的控制系统为一致全局渐近稳定的。

3) 以“海鲟 03”号无人艇操纵运动模型及辨识的参数为基础,通过与传统基于视线导引的航迹跟踪算法进行仿真实验对比分析,表明了文中所提出的控制算法具有更好的航迹跟踪效果和动态性能,具有一定的先进性。

4) 在青岛至连云港之间某海域,利用“海鲟 03”号无人艇对所提出的控制算法进行了海上试验,验证了该算法在实际工程应用中的有效性。

参考文献

- [1] 张树凯,刘正江,张显库,等. 无人船艇的发展及展望[J]. 世界海运, 2015, 38(9): 29. DOI:10.16176/jenki21-1284. 2015. 09.008
ZHANG Shukai, LIU Zhengjiang, ZHANG Xianku, et al. The development and outlook of unmanned vessel[J]. World Shipping, 2015, 38(9): 29. DOI:10.16176/jenki21-1284. 2015.09.008
- [2] 薛春祥,黄孝鹏,朱咸军,等. 外军无人系统现状与发展趋势[J]. 雷达与对抗, 2016, 36(1): 1. DOI:10.19341/j.cnki.issn.1009-0401.2016.01.001
XUE Chunxiang, HUANG Xiaopeng, ZHU Xianjun, et al. Status quo and development trends of foreign military's unmanned systems[J]. Radar & ECM, 2016, 36(1): 1. DOI: 10.19341/j.cnki.issn.1009-0401.2016.01.001
- [3] 王浩铎,王钦若,吴小泽. 船舶全局一致渐进路径跟踪变积分增益导航策略[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(3): 849. DOI:10.7641/CTA.2015.14067
WANG Haoduo, WANG Qinruo, WU Xiaoze. Uniformly globally asymptotically stable path following with integral gain-variable guidance law for ships[J]. Control Theory & Applications, 2015, 32(3): 849. DOI:10.7641/CTA.2015.14067
- [4] 王常顺,肖海荣. 基于自抗扰控制的水面无人艇路径跟踪控制器[J]. 山东大学学报(工学版), 2016, 46(4): 54. DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2016.010
WANG Changshun, XIAO Hairong. Path following controller for unmanned surface vessels based on ADRC[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2016, 46(4): 54. DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2016.010
- [5] FOSSEN T I, PETTERSEN K Y. On uniform semiglobal exponential stability (USGES) of proportional line-of-sight guidance laws[J].

- Automatica, 2014, 50(11): 2912. DOI:10.1016/j.automatica.2014.10.018
- [6] FOSSEN T I, LEKKAS A M. Direct and indirect adaptive integral line-of-sight path-following controllers for marine craft exposed to ocean currents[J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2015, 28(3): 20. DOI:10.1002/acs.2550
- [7] BORHAUG E, PAVLOV A, PETTERSEN K Y. Integral LOS control for path following of underactuated marine surface vessels in the presence of constant ocean currents[J]. Proceedings of the 47th IEEE Conference on Decision and Control. Cancun, Mexico: IEEE, 2008: 4984. DOI:978-1-4244-3124-3/08
- [8] 田勇,王丹,彭周华,等. 无人水面艇直线航迹跟踪控制器的设计与验证[J]. 大连海事大学学报, 2015, 41(4): 14. DOI:10.16411/j.cnki.issn1006-7736.2015.04.017
TIAN Yong, WANG Dan, PENG Zhouhua, et al. Design and validation of path tracking controller for USV along straight-lines[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2015, 41(4): 14. DOI:10.16411/j.cnki.issn1006-7736.2015.04.017
- [9] OH S R, SUN Jing. Path following of underactuated marine surface vessels using line-of-sight based model predictive control[J]. Ocean Engineering, 2010, 37(2): 289. DOI:10.1016/j.oceaneng.2009.10.004
- [10] FOSSEN T I, PETTERSEN K Y, GALEAZZI R. Line-of-sight path following for dubins paths with adaptive sideslip compensation of drift forces[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015, 23(2): 820. DOI:10.1109/TCST.2014.2338354
- [11] CAHARIJA W, PETTERSEN KY, SORENSEN A J, et al. Relative velocity control and integral LOS for path following of autonomous surface vessels: Merging intuition with theory[J]. Engineering for the Marine Environment, 2014, 228(2): 180. DOI:10.1177/1476-090213512293
- [12] DO K D. Global robust adaptive path-tracking control of underactuated ships under stochastic disturbances[J]. Ocean Engineering, 2016, 111: 267. DOI:10.1016/j.oceaneng.2015.10.038
- [13] 董早鹏,刘涛,万磊,等. 基于 Takagi-Sugeno 模糊神经网络的欠驱动无人艇直线航迹跟踪控制[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(4): 863. DOI:10.16322/j.cnki.issn123-7687.2015.04.014
DONG Zaopeng, LIU Tao, WAN Lei, et al. Straight-path tracking control of underactuated USV based on Takagi-Sugeno fuzzy neural network[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(4): 863. DOI:10.16322/j.cnki.issn123-7687.2015.04.014
- [14] ZHANG Tianhong, ZHANG Jun, LIU Zhilin, et al. Finite time control line path following of underactuated surface vessels[C]// Proceedings of the 34th Chinese control conference. Hangzhou: IEEE, 2015: 5084. DOI:10.1109/ChiCC.2015.7260432
- [15] WIIG M S, PETTERSEN K Y, KROGSTAD T R. Uniform semiglobal exponential stability of integral line-of-sight guidance laws[J]. IFAC - PapersOnLine, 2015, 48(16): 61. DOI:10.1016/j.ifacol.2015.10.259

(编辑 张 红)