

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202402012



速度矢量场二阶滑模无人艇引导律

温锦元, 黄宴委

(福州大学 电气工程及自动化学院, 福建 福州 350116)

摘要: 针对航速和航道未知扰动等因素,提出一种速度矢量场二阶滑模无人水面艇(USV)引导律。首先,建立无人艇运动学和航向角动力学模型;其次构造路径误差(y_e)模型,设计基于航速(V_g)的路径误差矢量场,速度越大,航向角变化越小;再结合二阶滑模面设计一种速度矢量场二阶滑模无人艇引导律,并考虑未知扰动因素 Δ 分析速度矢量场二阶滑模无人艇引导律的稳定性。仿真结果表明:相比于经典矢量场,速度矢量场有效实现航速 V_g 越快,航向角变化率越小,矢量场越平缓,提高了USV航行安全性和稳定性;基于速度矢量场二阶滑模无人艇引导律的路径跟踪控制系统鲁棒性更强,路径跟踪准确度更高,能够较好地完成路径跟踪。

关键词: 无人水面艇; 矢量场引导律; 路径跟踪; 滑模控制

中图分类号: TP 273

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2024)03-0324-08

Second-Order Sliding Mode Guidance Law in
Velocity Vector Field for Unmanned Surface Vessel

WEN Jinyuan, HUANG Yanwei

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: Aiming at factors such as unknown disturbances of course speed and course path, a second-order sliding mode guidance law in velocity vector field for unmanned surface vessel (USV) is proposed in the paper. Firstly, kinematics and course angle dynamics models of USV are established. Secondly, the path error (y_e) model is constructed, and the path error vector field based on course speed (V_g) is designed. The greater the speed, the smaller the change of course angle. Recombined with the second-order sliding mode surface, a velocity vector field second-order sliding mode USV guidance law is designed, and the stability of velocity vector field second-order sliding mode USV guidance law is analyzed considering the unknown disturbance factor Δ . The simulation results show that compared with the classical vector field, the velocity vector field achieves faster course speed V_g with smaller course angle change rate and smoother vector field, which improves the navigation safety and stability of USV. The path tracking control system based on the second-order sliding mode guidance law in a velocity vector field exhibits enhanced robustness and higher accuracy in path following, which achieves path tracking with remarkable precision.

Keywords: unmanned surface vessel; vector field guidance law; path following; sliding mode control

无人水面艇(unmanned surface vessel, USV)是一种用于水上的独立可控的无人驾驶平台^[1]。路径跟踪问题是实现USV高精度控制的重中之重,而引导算法是完成路径跟踪任务的关键。现阶段导

收稿日期: 2024-02-12

通信作者: 黄宴委(1976-),教授,博士,主要从事运动控制、鲁棒控制及非线性控制的研究。E-mail: sjtu_huanghao@fzu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51977040);福建省工业科技引导项目(2019H0007)

引算法种类繁多,例如,纯跟踪算法^[2]、视线导引算法^[3-4]、矢量场导引(vector field guidance,VFG)算法^[5-7]。纯跟踪算法可以缩小位置误差,但无法缩小角度误差;视线导引算法对前视距离依赖大,变化敏感。VFG分为矢量场(vector field,VF)设计和引导律设计两部分,对比纯追踪算法和视线导引算法,矢量场算法^[8-10]设计简单且控制性能优秀。

然而,VF主要考虑路径误差设计跟踪轨迹。针对三维路径跟踪问题,文献[11]扩展二维全局路径误差VF,使机器人能够实现三维路径跟踪。文献[12]提出一种利用亥姆霍兹定理构建二维和三维路径误差VF。文献[13]提出一种能够调节冲击时间和飞行角度的三维路径误差VF。针对无人机路径跟踪精度和安全性问题,文献[14]利用亥姆霍兹定理构建二维路径误差VF,并结合反步法设计控制器,提高欠驱动飞艇跟踪精度。文献[15]利用滑模控制理论设计位置误差VF,将VF视为滑模面,保证任意初始状态的无人机都能跟踪上期望路径。这些研究利用路径误差设计VF,忽略了运动对象的动态特征。然而,动态特征直接影响系统的安全性和精度。因此,引入运动对象的动态特性来设计VF是非常重要的。路径跟踪精度还取决于VFG引导律设计,文献[15]在路径误差VF的基础上,利用饱和函数设计VFG引导律,有效地提高跟踪系统的鲁棒性。文献[16]在一阶航向角方程中引入扰动量,根据航向角误差设计自适应VFG引导律,实时估计外界扰动进行补偿,使无人机在复杂的外界情况下,能够准确跟踪期望路径。基于VFG控制精度高特点,文献[17]将VF应用于USV路径跟踪,设计了一种基于VFG的二维路径跟踪控制系统,使用LS-SVM方法辨识参数,该控制系统具有较好的鲁棒性。文献[18]提出了一种基于路径误差的时变VFG引导律,利用估计器补偿外界扰动,设计自动驾驶仪,给出半叶指数稳定性证明,由此构建的级联系统鲁棒性较好,但这些研究成果未考虑对象的运动模型特性而设计VFG,难以保证路径跟踪的性能。

考虑航速和航道未知扰动等因素,本文提出基于一种基于速度矢量场的二阶滑模无人艇引导律,能够实现快速准确跟踪期望路径。

1 USV 平面模型

在忽略垂荡、横摇和纵摇等自由度时,USV在水面运动可以简化为3个自由度:纵荡,横荡和艏摇。USV平面运动示意图,如图1所示。图1中:XY为地球坐标系,X为正北向,Y为正东向; ψ 为艏向角; β 为漂移角; χ 为航向角; (x,y) 为USV当前的位置坐标; u,v,r 分别为船体坐标系 $x_g y_g$ 下的纵荡速度,横荡速度和转艏角速度; V_g 为航速; L 为期望路径;期望路径 P 点坐标为 (x_p,y_p) , α_p 为 P 点的路径切向角; y_e 为路径位置误差。

1.1 运动学模型

USV运动学模型为

$$\dot{x}=u\cos\psi-v\sin\psi,\quad \dot{y}=u\sin\psi+v\cos\psi.\tag{1}$$

式(1)中: $u=V_g\cos\beta$; $v=V_g\sin\beta$; $\chi=\psi+\beta$ 。

式(1)化简为位置运动学模型,即

$$\dot{x}=V_g\cos\chi,\quad \dot{y}=V_g\sin\chi.\tag{2}$$

1.2 航向角动力学模型

在实际跟踪过程中,环境扰动的形式非常复杂,并依赖于许多参数,航向角动力学方程^[18]为

$$\dot{\chi}=a(\chi_e-\chi)+\Delta.\tag{3}$$

式(3)中: χ_e 为矢量场引导律; a 为时间常数; Δ 为外界干扰。

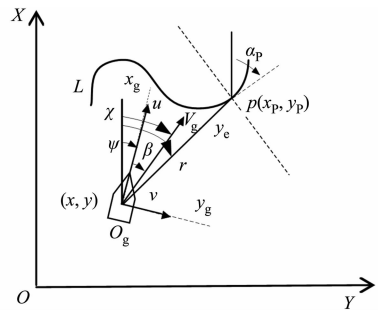


图1 USV平面运动示意图

Fig. 1 Schematic diagram of USV plane motion

2 速度的路径误差矢量场

2.1 位置误差设计

USV路径跟踪示意图,如图2所示。图2中:跟踪与 P 相切半径为 R 的圆 o ;XY地球坐标系转为 X_1Y_1 为极坐标系;圆心坐标为 (x_o,y_o) ;d为USV与圆心距离; γ 为USV相对于圆心角度。

圆心坐标 $o(x_o, y_o)$ 可以表示为

$$\left. \begin{aligned} x_o &= x - d \cos \gamma, \\ y_o &= y - d \sin \gamma. \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

将式(4)代入式(2),有

$$\left. \begin{aligned} \dot{d} &= V_g \cos(\chi - \gamma), \\ \dot{\gamma} &= \frac{V_g}{d} \sin(\chi - \gamma). \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

由图 2 可知,路径误差(y_e)计算式为

$$y_e = d - R. \tag{6}$$

对式(6)求导,并代入式(5),有

$$\dot{y}_e = V_g \cos(\chi - \gamma). \tag{7}$$

2.2 速度路径误差矢量场的设计

航速矢量场(χ_d)为

$$\chi_d = \gamma - \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left(\left(1 - \frac{V_g}{V_m} \right) k_1 y_e \right). \tag{8}$$

式(8)中: V_m 为航速最大值; k_1 为常数, $k_1 > 0$ 。

由式(8)可知:当 y_e 很大时,矢量场 $\chi_d = \gamma - \pi$;当 $y_e = 0$ 时, $\chi_d = \gamma - \pi/2$ 。与经典矢量场^[15]对比,在 y_e 的基础上,考虑 V_g 因素。当 $V_g = 0$ 时,航速矢量场与经典矢量场一致, V_g 越大, χ_d 越小,表明航速越快,航向角越小,有效减小 USV 侧翻风险,提高航行安全,更全面合理。

设李雅普诺夫函数(W)为

$$W = \frac{1}{2} y_e^2. \tag{9}$$

对式(9)求导,并代入式(7),(8),有

$$\begin{aligned} \dot{W} &= V_g y_e \cos \left(-\frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left(\left(1 - \frac{V_g}{V_m} \right) k_1 y_e \right) \right) = \\ &= -V_g y_e \sin \left(\tan^{-1} \left(\left(1 - \frac{V_g}{V_m} \right) k_1 y_e \right) \right) \leq 0. \end{aligned} \tag{10}$$

因此,当 $\chi = \chi_d$ 时,能够精准跟踪期望路径,即 $y_e \rightarrow 0$;航速矢量场(χ_d)能够收敛到给定路径中。

3 速度矢量场二阶滑模无人艇引导律

3.1 速度矢量场二阶滑模无人艇引导律的设计

定义航向角误差(χ_e)为

$$\chi_e = \chi - \chi_d. \tag{11}$$

设计速度矢量场二阶滑模无人艇引导律(VVFSOSG)的 χ_e^c 为

$$\chi_e^c = \chi^c + \Delta \chi. \tag{12}$$

式(12)中: χ^c 为等效航向角引导律; $\Delta \chi$ 为鲁棒补偿律。

在不考虑不确定量(Δ)的情况下, χ^c 为

$$\dot{\chi} = a(\chi^c - \chi). \tag{13}$$

对式(11)求导,代入式(8)和式(13)可得

$$\dot{\chi}_e = a(\chi^c - \chi) - \frac{V_g}{d} \sin(\chi - \gamma) + \frac{\left(\left(1 - \frac{V_g}{V_m} \right) k_1 \cos(\chi - \gamma) - \left(1 - \frac{\dot{V}_g}{V_m} \right) k_1 y_e \right)}{1 + \left(\left(1 - \frac{V_g}{V_m} \right) k_1 y_e \right)^2}. \tag{14}$$

因此,USV 路径跟踪过程可视为匀速运动, $\dot{V}_g \approx 0$,故式(14)可简化为

$$\dot{\chi}_e = a(\chi^c - \chi) - \frac{V_g}{d} \sin(\chi - \gamma) + \frac{V_m(V_m - V_g)k_1 \cos(\chi - \gamma)}{V_m^2 + \left((1 - V_g)k_1 y_e \right)^2}. \tag{15}$$

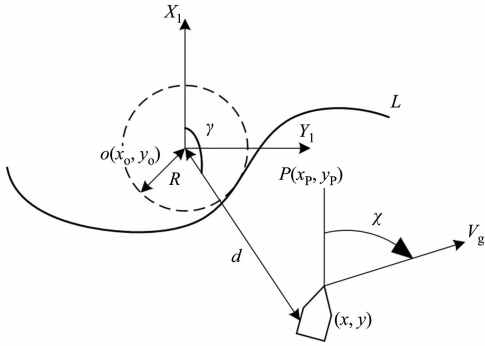


图 2 USV 路径跟踪示意图

(7) Fig. 2 Schematic diagram of USV path following

选择等效航向角引导律为

$$\chi^c = \chi + \frac{V_g}{\alpha d} \sin(\chi - \gamma) - \frac{V_m(V_m - V_g)k_1 \cos(\chi - \gamma)}{V_m^2 + ((1 - V_g)k_1 y_e)^2}。 \tag{16}$$

为抑制不确定量(Δ)对航向角带来的不利影响,需设计鲁棒补偿项(Δχ)。

对航向角误差进行微分,有

$$\begin{aligned} \dot{\chi}_e &= \dot{\chi} - \dot{\chi}_d = \alpha(\chi^c + \Delta\chi - \chi) + \Delta - \\ &\frac{V_g}{d} \sin(\chi - \gamma) + \frac{V_m(V_m - V_g)k_1 \cos(\chi - \gamma)}{V_m^2 + ((1 - V_g)k_1 y_e)^2}。 \end{aligned} \tag{17}$$

构造滑模面 $S^{[19-21]}$,有

$$S = \chi_e。 \tag{18}$$

对式(18)求导,并代入式(16),有

$$\dot{S} = \alpha \Delta\chi - \Delta。 \tag{19}$$

在式(19)的基础上构造二阶滑模面 $^{[22-23]}$,有

$$\xi = \dot{S} + mS。 \tag{20}$$

式(20)中: m 为常数,且 $m > 0$ 。

对式(20)求导,有

$$\dot{\xi} = m \dot{S} + \ddot{S}。 \tag{21}$$

选取滑模面 ξ 控制律 $^{[24]}$,有

$$\dot{\xi} = -\lambda\xi - \eta\delta \times \text{sgn}(\xi)。 \tag{22}$$

式(22)中: λ, p 和 q 为常数,且 $\lambda > 0, p, q \in \{2n+1, n=0, 1, 2, \dots\}, 1 < p/q < 2$ 。

由式(21),(22),有

$$\ddot{S} = -\lambda\xi - \eta\delta \times \text{sgn}(\xi) - m \dot{S}。 \tag{23}$$

对式(19)求导,有

$$\ddot{S} = \alpha \Delta \dot{\chi} - \dot{\Delta}。 \tag{24}$$

将式(24)代入式(23),可最终求得控制量,即

$$\Delta\chi = -\frac{1}{\alpha} \int (-\lambda\xi - \eta\delta \times \text{sgn}(\xi) - m \dot{S} - \dot{\Delta})。 \tag{25}$$

为有效抑制 $\dot{\Delta}$,有

$$\eta\delta > |\dot{\Delta}|。 \tag{26}$$

其中, $\Delta^{[25]}$ 为

$$\Delta = A_w \sin(\omega_e t + \theta)。 \tag{27}$$

式(27)中: A_w 为扰动幅值; ω_e 为扰动频率; θ 为扰动相位。

对式(27)求导,有

$$\dot{\Delta} = A_w \omega_e \cos(\omega_e t + \theta)。 \tag{28}$$

$$|A_w \omega_e| = |\dot{\Delta}|。 \tag{29}$$

将式(26)代入式(29),有

$$\eta\delta > |A_w \omega_e|。 \tag{30}$$

由式(30)可知,当 $\eta\delta > |A_w \omega_e|$ 时,能够有效抑制 $\dot{\Delta}$,则式(25)可简化为

$$\Delta\chi = -\frac{1}{\alpha} \int (-\lambda\xi - \eta\delta \times \text{sgn}(\xi) - m \dot{S})。 \tag{31}$$

综合式(12),(16),(31),可得到 χ_ϵ^c ,即

$$\chi_\epsilon^c = \chi + \frac{V_g}{\alpha d} \sin(\chi - \gamma) - \frac{V_m(V_m - V_g)k_1 \cos(\chi - \gamma)}{V_m^2 + ((1 - V_g)k_1 y_e)^2} -$$

$$\frac{1}{\alpha} \int (-\lambda \xi - \eta \delta \times \text{sgn}(\xi) - m \dot{S})。$$

(32)

3.2 VVFSOSG 稳定性分析

李雅普诺夫函数(V)为

$$V = \frac{1}{2} \xi^2。$$

(33)

对式(33)求导,有

$$\dot{V} = \zeta(m \dot{S} + \ddot{S})。$$

(34)

将式(24)代入式(34),有

$$\dot{V} = \zeta(m \dot{S} + (\alpha \Delta \dot{\chi} - \dot{\Delta}))。$$

(35)

将式(31)代入式(35),有

$$\dot{V} = \zeta(m \dot{S} + (- (\lambda \xi + \eta \delta \times \text{sgn}(\xi) + m \dot{S}) - \dot{\Delta})) < \zeta(- \eta \delta \times \text{sgn}(\xi) - \dot{\Delta})。$$

(36)

将式(30)代入式(36),有

$$\dot{V} < \zeta(- |A_w \omega_e| \times \text{sgn}(\xi) - \dot{\Delta}) < \zeta(- |A_w \omega_e| |\xi| - \dot{\Delta}) < 0。$$

(37)

式(37)说明在有限时间内,滑模面 ξ 收敛至 0,根据滑模面 ξ 结构,滑模面 S 也将收敛至 0,因此,航向角(χ)在 VVFSOSG 作用下能够到达滑模面 ξ 并最终收敛至 χ_d 。

4 仿真验证

基于 VVFSOSG 的路径跟踪系统框图^[26],如图 3 所示。图 3 中: τ_u 为前向推力; τ_r 为转艏力矩。

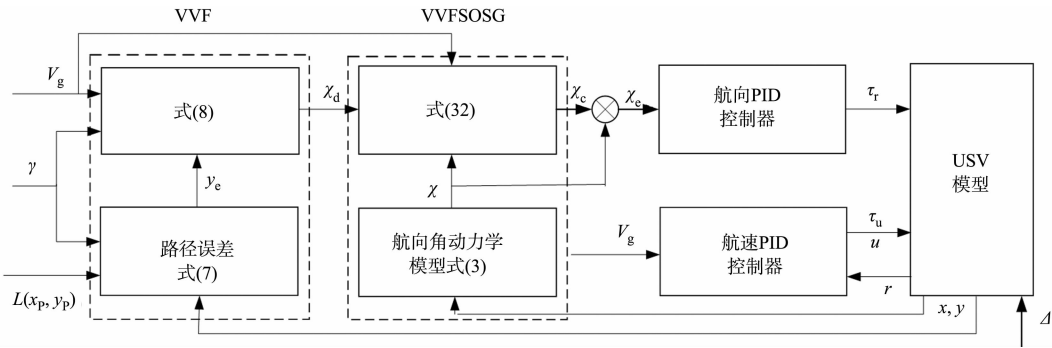


图 3 基于 VVFSOSG 的路径跟踪系统框图

Fig. 3 Block diagram of path following system base on VVFSOSG

首先,根据船体位置和期望路径,由式(7)求取位置误差,由式(8)得到 VVF 的航速矢量场(χ_d)。VVF 的 χ_d 和航向角(χ)通过式(32)得到 VVFSOSG 的 χ_e ,最终利用航向和航速 PID 控制器实现 USV 路径跟踪控制。

Fossen 模型参数^[26]如下:船体长度为 1.180 m,宽度为 0.355 m,质量为 8.46 kg, $I_{zz}=1.07$, $X_u'=-0.42$, $Y_v'=-1.07$, $N_r'=-0.13$, $X_u=4.39$, $Y_v=20$, $Y_r=-0.2$, $N_v=-0.2$, $N_r=5$, $X_{|u|u}=-10.65$, $Y_{|v|v}=-15.6$, $N_{|v|r}=-15$ 。

基于 VVFSOSG 路径跟踪系统,式(8)中 VVF 参数如下: $V_m=10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $k_1=1$ 。式(32) VVFSOSG 参数如下: $a=1.5$, $\lambda=50$, $\eta=25$, $\delta=1$, $m=1/70$,航向和航速均采用 PID 控制。控制器参数如下: $k_p=150$, $k_i=10$, $k_d=100$ 。

为展示 VVF 和 VVFSOSG 的优越性,引入 VF 和 VFG^[16]。VF 参数如下: $\alpha=1.5$, $k=1.5$; VFG 参数如下: $\kappa=3.5$,施加扰动 Δ ^[25], $A_w=5$, $\theta=0\text{ rad}$, $\omega_e=0.1\text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 。期望路径(L)设置如下: $x_p=t$, $y_p=5\sin(0.01t)$ 和 $5t+4$, $0\leq t\leq 50\text{ s}$ 。

当航速(V_g)为 $7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,USV 直线跟踪轨迹和位置误差(y_e),分别如图 4,5 所示。由图 5 可知:VFG 跟踪轨迹发生了抖动,位置误差(y_e)为 $\pm 0.100\text{ m}$,而 VVFSOSG 位置误差(y_e)仅有 $\pm 0.001\text{ m}$ 。

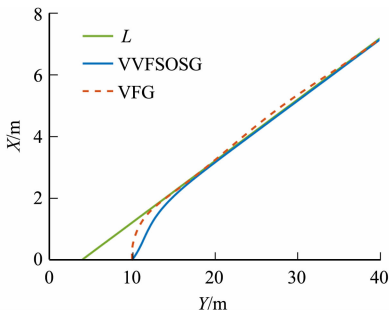


图 4 USV 直线跟踪轨迹

Fig. 4 Straight tracking trajectory

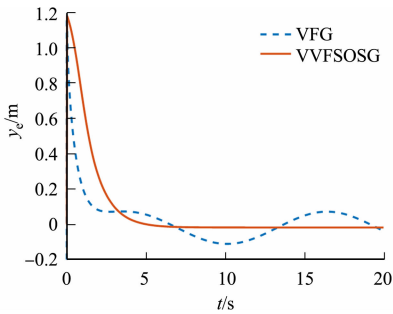


图 5 直线跟踪位置误差变化

Fig. 5 Straight tracking position error

USV 曲线跟踪轨迹和位置误差(y_e), 分别如图 6,7 所示。由图 7 可知:VFG 跟踪轨迹抖动加剧, VFG 位置误差(y_e)为 ± 0.200 m,而 VVFSOSG 位置误差(y_e)仅有 ± 0.003 m;基于 VVFSOSG 的路径跟踪系统能够有效抵抗干扰,跟踪系统的鲁棒性更强,跟踪的精度更高。

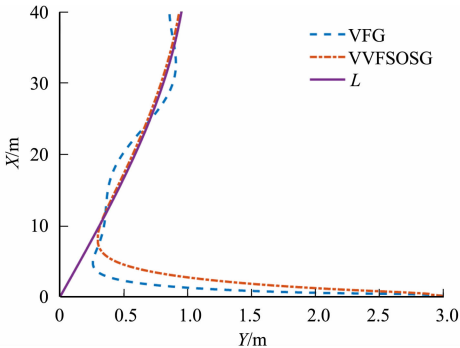


图 6 USV 曲线跟踪轨迹

Fig. 6 Curve tracking trajectory of USV

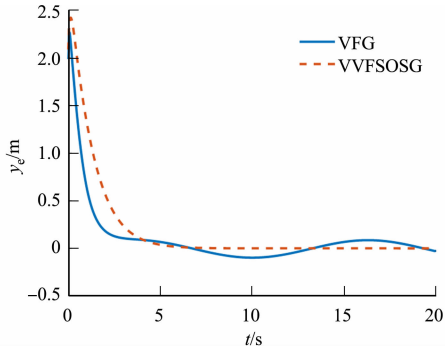


图 7 曲线跟踪位置误差变化

Fig. 7 Curve tracking position error

当 $k_1=1$ 时,不同 V_g 时的 USV 跟踪轨迹和航向角(χ)响应,分别如图 8,9 所示。当航速(V_g)为 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,不同 k_1 时的 USV 跟踪轨迹和航向角(χ)响应,分别如图 10,11 所示。

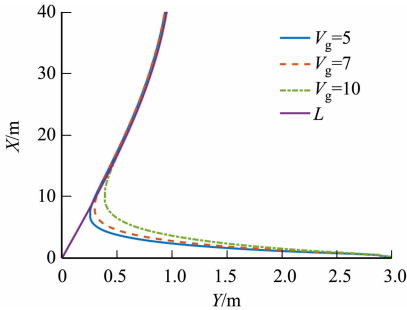


图 8 不同 V_g 时 USV 跟踪轨迹

Fig. 8 Tracking trajectory of USV with different V_g

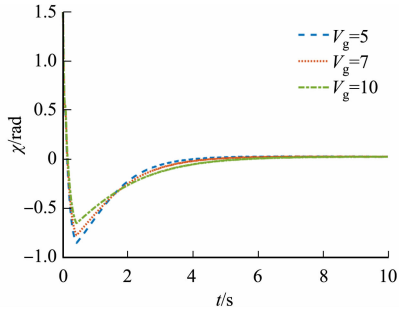


图 9 不同 V_g 时航向角响应

Fig. 9 Course angle-response with different V_g

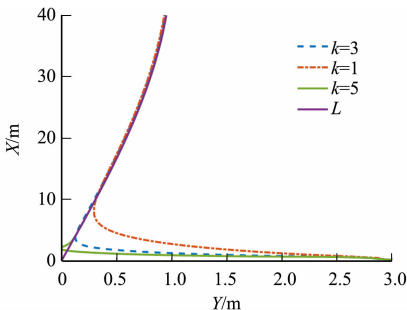


图 10 不同 k_1 时 USV 跟踪轨迹

Fig. 10 Tracking trajectory of USV with different k_1

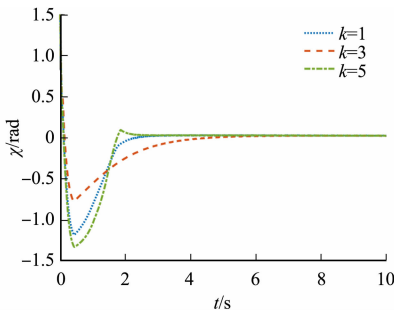


图 11 不同 k_1 时航向角响应

Fig. 11 Course angle-response with different k_1

由图 9 可知:不同航速 V_g 下,VVF 的 USV 跟踪轨迹和航向角(χ)响应,表明航速(V_g)越大,航向

角(χ)变化率越小,收敛时间越长,跟踪轨迹越顺滑;当航速(V_g)为 $7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,能够提高 USV 航行安全性,并且收敛时间合适。

由图 10,11 可知: k_1 越大,收敛时间越小,航向角变化率越大;当 $k_1=5$ 时,USV 无法平稳跟踪期望路径,出现抖动,因此,选择 $k_1=1$ 最为合适。

5 结 论

在实际航行中,由于航速(V_g)和航道未知扰动的影响,致使转艏角速度出现偏差,进而影响航向角,最终导致了 USV 无法精准跟踪期望路径。速度矢量场二阶滑模无人艇引导律能够实现快速准确跟踪期望路径。

首先,建立运动学和航向角动力学模型;其次,构造路径误差模型,引入航速变量(V_g)设计 VVF,以达到速度越大航向角变化越小,速度矢量场越平缓;最后,结合二阶滑模面,设计一种 VVFSOSG,并考虑未知扰动分析 VVFSOSG 的稳定性。

仿真结果表明:相比于 VF,VVF 有效实现航速(V_g)越快,航向角越小,能减小 USV 侧翻风险,有助于提高航行安全;基于 VVFSOSG 的路径跟踪控制系统鲁棒性及路径跟踪准确度更高。

参考文献:

[1] ZHANG Weidong,LIU Xiaocheng,HANG Peng. Progress and challenges of overwater unmanned systems[J]. Acta Aytomatica Sinica,2022,46(5):847-857. DOI:10. 16383/j. aas. c190363.

[2] JOONWOO A,SEHO S,MISUNG K,*et al.* Accurate path tracking by adjusting look-ahead point in pure pursuit method[J]. International Journal of Automotive Technology,2021,22(1):119-129. DOI:10. 1007/s12239-021-0013-7.

[3] LIU Lu,WANG Dang,ZHOU Huapeng,*et al.* Predictor-based LOS guidance law for path following of underactuated marine surface vehicles with side slip compensation[J]. Ocean Engineering,2016,124:340-348. DOI:10. 1109/ICICIP. 2015. 7388184.

[4] LIU Fengxu,SHEN Yue,WANG Dianrui,*et al.* Drift angle compensation-based adaptive line-of-sight path following for autonomous underwater vehicle[J]. Applied Ocean Research,2019,93:101943. DOI:10. 1016/j. apor. 2019. 101943.

[5] 赵述龙,王祥科,张代兵,等. 固定翼无人机曲线路径跟踪的积分向量场方法[J]. 国防科技大学学报,2018,40(2):119-124. DOI:10. 11887/j. cn. 201802019.

[6] LIANG Yueqian,JIA Yingmin. Tangent vector field approach for curved path following with input saturation[J]. Systems and Control Letter,2017,104:49-58. DOI:10. 1016/j. sysconle. 2017. 04. 001.

[7] LAWRENCE D A,FREW E W,PISANO W J. Lyapunov vector fields for autonomous unmanned aircraft flight control[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics: A Publication of the American Institute of Aeronautics and Astronautics Devoted to the Technology of Dynamics and Control,2008(5):31. DOI:10. 2514/1. 34896.

[8] FREW E W,LAWRENCE D A,MORRIS S. Coordinated standoff tracking of moving targets using Lyapunov guidance vector fields[J]. Journal of Guidance Control and Dynamics,2008,31(2):290-306. DOI:10. 2514/1. 30507.

[9] JUN Woyoung,LIM S H,LE Dongjin,*et al.* Unmanned aircraft vector field path following with arrival angle control [J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems,2016,84:311-325. DOI:10. 1007/s10846-016-0332-5.

[10] YAO Xuliang,WANG Xiaowei. Integral vector field control for three-dimensional path following of autonomous underwater vehicle[J]. Journal of Marine Science and Technology,2021,26(1):159-173. DOI:10. 1007/s00773-020-00730-9.

[11] YAO W,KAPITANYUK Y A,CAO M. Robotic path following in 3D using a guiding vector field[C]// IEEE Conference on Decision and Control. New York:IEEE Press,2018:4475-4480. DOI:10. 1109/CDC. 2018. 8619780.

[12] LIANG Yueqiang,JIA Yingmin. Combined vector field approach for 2D and 3D arbitrary twice differentiable curved path following with constrained UAVs[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems,2016,83(1):133-160. DOI:10. 1007/s10846-015-0308-x.

[13] DONG Wei,WANG Chunyan,LIU JunHui,*et al.* Three-dimensional vector guidance law with impact time and an-

- gle constraints[J]. Journal of the Franklin Institute, 2023, 360(2): 693-718. DOI: 10.1016/j.jfranklin. 2022. 11. 035.
- [14] 左宗玉,王欣欣. 欠驱动飞艇平面路径跟踪控制[J]. 控制与决策, 2017, 32(6): 6. DOI: 10.13195/j. kzyjc. 2016. 0464.
- [15] NELSON D, BARBER D B, MCLAIN T, *et al.* Vector field path following for miniature air vehicles[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2007, 23(3): 519-529. DOI: 10.1109/TRO. 2007. 898976.
- [16] WANG Ximen, SPANDAN R, STEFANO F, *et al.* Adaptive vector field guidance without a priori knowledge of course dynamics and wind[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022, 27(6): 4597-4607. DOI: 10.1109/TMECH. 2022. 3160480.
- [17] HX A, TIF B, CGS A. Uniformly semiglobally exponential stability of vector field guidance law and autopilot for path-following[J]. European Journal of Control, 2020, 53: 88-97. DOI: 10.1016/j. ejcon. 2019. 09. 007.
- [18] XU Haitong, GUEDES S C. Vector field path following for surface marine vessel and parameter identification based on LS-SVM[J]. Ocean Engineering, 2016, 113: 151-161. DOI: 10.1016/j. oceaneng. 2015. 12. 037.
- [19] DAS M, MAHANTA C. Optimal second order sliding mode control for linear uncertain systems[J]. ISA Transactions, 2014, 53(6): 1807-1815. DOI: 10.1016/j. isatra. 2014. 08. 010.
- [20] 王勃,王天擎,于泳,等. 感应电机电流环非线性积分滑模控制策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(10): 2039-2048. DOI: 10.19595/j. cnki. 1000-6753. tees. 200250.
- [21] 康尔良,贺建智,王一琛. 永磁同步电机非奇异终端滑模控制器的设计[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(12): 58-64. DOI: 10.15938/j. emc. 2021. 12. 007.
- [22] 陈正升,王雪松,程玉虎. 考虑扰动与输入饱和的机械臂连续非奇异快速终端滑模控制[J]. 控制与决策, 2022, 37(4): 903-912. DOI: 10.13195/j. kzyjc. 2020. 1335.
- [23] CHALANGA A, KAMA S, FRIDMAN L M, *et al.* Implementation of super-twisting control: Super-twisting and higher order sliding-mode observer-based approaches[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(6): 3677-3685. DOI: 10.1109/TIE. 2016. 2523913.
- [24] GAO Weibing, HUNG J C. Variable structure control of nonlinear systems: A new approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1993, 40(1): 45. DOI: 10.1109/41. 184820.
- [25] LUO Weilin, FAN Zhang. Time-invariant discontinuous feedback stabilization of underactuated surface vessel under wave disturbance[C]// IEEE International Conference on Security, Pattern Analysis, and Cybernetics. Chengdu: IEEE Press. 2021: 466-469.
- [26] FOSSEN T I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control[M]. West Sussex: John Wiley and Sons, 2011.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 陈婧)