

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.004

基于卡尔曼滤波离散滑模控制的明轮船直线跟踪

洪剑青^{1,2} 赵德安¹ 孙月平¹ 张军¹ 刘波² 刘晓洋¹

(1. 江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013; 2. 镇江高等专科学校现代装备制造学院, 镇江 212028)

摘要: 针对明轮船作业过程中风、浪等引起的低频扰动, 为了节约能源、降低由扰动引起控制系统的主动动作频次、延长明轮船续航时间, 实现明轮船的高精度导航控制, 降低风浪干扰的影响, 提出基于卡尔曼滤波的离散滑模控制方式。通过建立水动力模型和偏航角动态响应模型, 计算离散滑模控制的增益系数。经过仿真验证与实船试验, 并与 PD 控制方式的效果进行对比, 最大超调量比 PD 控制方式减小 25%, 调整时间减少 50%, 航迹偏差低于 10 cm。基于卡尔曼滤波的离散滑模控制方法实现了高精度的明轮船直线航迹跟踪, 且明轮船的航行过程更加平稳。

关键词: 水产养殖; 明轮船; 卡尔曼滤波; 离散滑模控制

中图分类号: S969.31⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)09-0033-07

Linear Trajectory Tracking of Paddle Boat Using Discrete Sliding Mode Control Based on Kalman Filter

HONG Jianqing^{1,2} ZHAO Dean¹ SUN Yueping¹ ZHANG Jun¹ LIU Bo² LIU Xiaoyang¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. School of Modern Equipment Manufacturing, Zhenjiang College, Zhenjiang 212028, China)

Abstract: A linear trajectory tracking algorithm for tracking operation, could be used by the paddle boat for aquaculture. In order to cope with complex working environments, high-precision navigation must be adopted. The paddle boat could continue to be disturbed by wind and waves during the voyage. Interference could cause fluctuations in the track of the paddle boat. In order to realize high-precision navigation control of paddle boat and reduce influence of wind and wave interference, improve the stability of paddle boat process, save energy, reduce active frequency of the control system caused by the disturbance, and extend the duration of sailing and operation of paddle boat, a discrete sliding mode control method based on Kalman filter was proposed. Through the establishment of hydrodynamic model and yaw angle dynamic response model, the gain coefficient of discrete sliding mode control was designed and calculated. The negative feedback signal was denoised by two-dimensional Kalman filtering. After simulation verification and the actual boat was tested in the lake, and compared with the effect of PD control mode. As a result, the maximum overshoot was less than 25% of the PD control mode, the adjustment time was reduced by 50%, and the track deviation was less than 10 cm. The discrete sliding mode control method based on Kalman filter achieved high-precision tracking of paddle boat, and the navigation process of paddle boat was more stable.

Key words: aquaculture; paddle boat; Kalman filter; discrete sliding mode control

0 引言

随着人民生活水平的提高, 人们对水产品的需

求不断增长, 极大地促进了水产养殖业的飞速发展^[1-3]。水产养殖业已成为国民经济不可缺少的组成部分, 年产值高达几百亿元。规模化生产促使水

收稿日期: 2019-02-10 修回日期: 2019-04-21

基金项目: 江苏省高校研究生科研创新计划项目(CXLX12_0661)、镇江市重点研发项目(现代农业)(NY2017013、NY2018022)、江苏省重点研发项目(现代农业)(BE2017331)、江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20170536)和江苏省海洋与渔业科技创新与推广项目(Y2017-36)

作者简介: 洪剑青(1971—), 男, 博士生, 镇江高等专科学校副教授, 主要从事农业自动化装置研究, E-mail: hongjianqing@163.com

通信作者: 赵德安(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事机器人控制技术和计算机控制应用研究, E-mail: dazhao@ujs.edu.cn

产养殖业向集约化、自动化、信息化、智能化的方向发展^[4-7]。

养殖水域通常水情比较复杂,水下植物较多。明轮船具有吃水浅、适航性好的特点,适宜作为水面作业装备的载体。水上作业装备实现智能化、自动化、信息化作业的方式,不仅可以提高作业效率、降低人力成本,克服工作时间的限制,且更加贴近养殖动物的生活习性^[8-9]。

明轮船的航迹跟踪是近来研究的热点。文献[9]建立了明轮船的水动力模型和控制方程。文献[8,10]详细给出明轮船航迹跟踪系统的硬件方案和模糊控制航迹跟踪方法^[8,10-12],实现了基本的跟踪。文献[13-14]采取鲁棒预测控制、障碍李亚普诺夫函数法,取得较好的控制效果,但是由于预测控制采取在线连续时域滚动计算,算法复杂、计算量较大、计算耗时和对系统计算资源需求较高、对反馈信号实时性要求较高;障碍李亚普诺夫函数法存在反步微分爆炸的可能,且控制方法未对反馈信号进行处理,实际使用中信号扰动较多,易造成执行器过多的不必要主动控制动作,会导致控制效果变差,浪费有限船载电能,缩短续航里程。文献[15]采取了PD控制对航迹跟踪,由于陆地行驶车辆无风浪干扰,PD控制对于陆地行走的车辆跟踪效果较好,对于受风浪不断干扰的明轮船而言,跟踪效果较差。因此,克服扰动对航迹跟踪的影响、降低控制运算量、提高系统稳定性是明轮船航迹跟踪研究的关键^[16]。针对实际状况,本文提出一种运算量较小的基于卡尔曼滤波的离散滑模控制方法实现明轮船的直线跟踪。

1 航迹跟踪系统建模

明轮船的航迹跟踪属于欠驱动水面运动系统。采用船舶运动坐标系,其运动方程^[9-10,17]为

$$\mathbf{M}\dot{\boldsymbol{\nu}} + \mathbf{N}(u_0)\boldsymbol{\nu} = \mathbf{b}\delta_R \quad (1)$$

其中

$$\boldsymbol{\nu} = [v \quad r]^T$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} \\ mx_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{N}(u_0) = \begin{bmatrix} -Y_v & mu_0 - Y_r \\ -N_v & mx_G u_0 - N_r \end{bmatrix} \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ N_{\delta R} \end{bmatrix}$$

式中 m ——明轮船质量,kg

x_G ——明轮船重心坐标,m

u_0 ——明轮船航行速度,m/s

I_z ——明轮船质量对 z 轴的惯性矩,kg·m²

$Y_{\dot{v}}, Y_{\dot{r}}, Y_v, Y_r, N_{\dot{v}}, N_{\dot{r}}, N_v, N_r, N_{\delta R}$ ——水动力系数

v ——横漂速度,m/s

r ——转艏角速度,(°)/s

δ_R ——明轮船虚舵角,(°)

航迹跟踪的核心是控制明轮船的船艏航向。通过调整船摇角使明轮船的航迹偏差不断得到纠正。根据文献[9-10],船舶运动时呈现非常大的惯性,因提供给明轮船控制船舶运动方向的能量有限,通常角速度低于3(°)/s,船舶运动具有低频特征,可以描述为一阶微分方程。在忽略横漂速度 v 的基础上,采取野本一阶模型(Nomoto)的形式^[17-19],给出明轮船的船摇角速度系统传递函数为

$$T\dot{r} + r = K\delta_R \quad (2)$$

$$\text{其中} \quad K = -\frac{n_{21}b_1 - n_{11}b_2}{\det(\mathbf{N}(u_0))}$$

$$\det(\mathbf{N}(u_0)) = Y_v(N_r - mx_G u_0) - N_v(Y_r - mu_0)$$

式中 n_{11}, n_{21} ——明轮船附加质量水动力系数

b_1, b_2 ——明轮船转艏水动力系数

T ——稳定性系数

K ——回转性系数

2 船舶运动的离散滑模控制

滑模变结构控制策略可以使系统“结构”具有随时间变化的开关特性。迫使系统沿着规定轨迹作高频、小幅运动实现滑动模态。离散滑模控制是滑模控制数字化方式^[20-21]。滑模控制器设计如下。

首先将船摇角运动传递函数转换为状态方程并离散化,得到离散船摇角运动状态方程

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) \quad (3)$$

式中 \mathbf{A} ——状态矩阵 \mathbf{B} ——输入矩阵

$\mathbf{x}(k+1), \mathbf{x}(k)$ ——系统在 $k+1, k$ 时刻的状态

$\mathbf{u}(k)$ ——系统在 k 时刻的输入量

设计切换函数为

$$s(k) = \mathbf{C}_e \mathbf{x}(k) \quad (4)$$

式中 \mathbf{C}_e ——控制参数

当系统运动进入理想滑动模态时, $s=0$,且切换面附近必是 $\lim_{s \rightarrow 0} s\dot{s} \leq 0$ 。可得

$$s(k+1) = s(k) = \mathbf{C}_e \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{C}_e \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{C}_e \mathbf{B}\mathbf{u}(k) \quad (5)$$

根据文献[20],设计离散滑模控制器 $\mathbf{u}(k)$ 为

$$\mathbf{u}(k) = \mathbf{u}_{eq}(k) + \mathbf{F}_D \mathbf{x}(k) \quad (6)$$

其中 $\mathbf{u}_{eq}(k) = -(\mathbf{C}_e \mathbf{B})^{-1} \mathbf{C}_e (\mathbf{A} - \mathbf{I}) \mathbf{x}(k)$ (7)

$$\mathbf{F}_D = [f_1 \quad f_2 \quad \cdots \quad f_n]$$

式中 f_1, f_2, \cdots, f_n 表示系统各状态变量的增益, \mathbf{I} 表示单位矩阵。

根据文献[20],定义Lyapunov函数为

$$V(k) = \frac{1}{2}s^2(k) \quad (8)$$

由式(5)~(7)得到

$$\begin{aligned} s(k+1) &= \mathbf{C}_e \mathbf{A} \mathbf{x}(k) - \mathbf{C}_e (\mathbf{A} - \mathbf{I}) \mathbf{x}(k) + \mathbf{C}_e \mathbf{B} \mathbf{F}_D \mathbf{x}(k) = \\ & \mathbf{C}_e \mathbf{x}(k) + \mathbf{C}_e \mathbf{B} \mathbf{F}_D \mathbf{x}(k) = s(k) + \mathbf{C}_e \mathbf{B} \mathbf{F}_D \mathbf{x}(k) \\ s^2(k+1) - s^2(k) &= 2s(k) \mathbf{C}_e \mathbf{B} \mathbf{F}_D \mathbf{x}(k) + \\ & (\mathbf{C}_e \mathbf{B} \mathbf{F}_D \mathbf{x}(k))^2 \quad (9) \end{aligned}$$

根据 Lyapunov 稳定性定理, $s(k) = 0$ 为全局稳定平衡面, 任意初始位置的状态都会趋向切换面 $s(k)$ 。取到达条件为

$$s^2(k+1) < s^2(k) \quad (10)$$

则由式(9)可得

$$(\mathbf{C}_e \mathbf{B} \mathbf{F}_D \mathbf{x}(k))^2 < -2s(k) \mathbf{C}_e \mathbf{B} \mathbf{F}_D \mathbf{x}(k)$$

$$\text{即} \quad \frac{1}{2}(\mathbf{C}_e \mathbf{B})^2 \left(\sum_{i=1}^n f_i \mathbf{x}_i(k) \right)^2 <$$

$$-s(k) \mathbf{C}_e \mathbf{B} \sum_{i=1}^n f_i \mathbf{x}_i(k)$$

取 $|f_i| = f_0, f_0 > 0$, 则对于每一个 i , 有

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}(\mathbf{C}_e \mathbf{B})^2 |f_i \mathbf{x}_i(k)| \sum_{i=1}^n |f_i \mathbf{x}_i(k)| < \\ -s(k) \mathbf{C}_e \mathbf{B} \sum_{i=1}^n f_i \mathbf{x}_i(k) \quad (11) \end{aligned}$$

定义

$$\gamma_i = \frac{1}{2}(\mathbf{C}_e \mathbf{B})^2 |\mathbf{x}_i(k)| \sum_{i=1}^n |f_i \mathbf{x}_i(k)| \quad (12)$$

将式(12)代入式(11)得到

$$f_0 \gamma_i < -s(k) \mathbf{C}_e \mathbf{B} \sum_{i=1}^n f_i \mathbf{x}_i(k) \quad (13)$$

可得

$$\gamma_i < \left| s(k) \mathbf{C}_e \mathbf{B} \sum_{i=1}^n f_i \mathbf{x}_i(k) \right| \quad (14)$$

即

$$|s(k)| > \frac{\gamma_i}{\left| \mathbf{C}_e \mathbf{B} \sum_{i=1}^n f_i \mathbf{x}_i(k) \right|} \quad (15)$$

只要满足式(15)即可满足条件式(10)。

由式(12)和式(15)得

$$|s(k)| > \frac{\gamma_i}{\left| \mathbf{C}_e \mathbf{B} \sum_{i=1}^n f_i \mathbf{x}_i(k) \right|} =$$

$$\frac{\frac{1}{2}(\mathbf{C}_e \mathbf{B})^2 |\mathbf{x}_i(k)| \sum_{i=1}^n |\mathbf{x}_i(k)|}{|\mathbf{C}_e \mathbf{B} \mathbf{x}_i(k)|} =$$

$$\frac{f_0 |\mathbf{C}_e \mathbf{B}| \sum_{i=1}^n |\mathbf{x}_i(k)|}{2}$$

$$\text{即} \quad f_0 < \frac{2|s(k)|}{|\mathbf{C}_e \mathbf{B}| \sum_{i=1}^n f_i \mathbf{x}_i(k)} \quad (16)$$

满足式(16)条件, 确定 f_0 。

综上所述, 离散滑模控制率为式(6)、(7)、(16), 即

$$\begin{cases} \mathbf{u}(k) = \mathbf{u}_{eq}(k) + \mathbf{F}_D \mathbf{x}(k) \\ \mathbf{u}_{eq}(k) = -(\mathbf{C}_e \mathbf{B})^{-1} \mathbf{C}_e (\mathbf{A} - \mathbf{I}) \mathbf{x}(k) \\ f_0 < \frac{2|s(k)|}{|\mathbf{C}_e \mathbf{B}| \sum_{i=1}^n f_i \mathbf{x}_i(k)} \end{cases} \quad (17)$$

则系统稳定。

3 卡尔曼滤波

明轮船在航行过程中不断受到风、波浪的干扰, 船舶的艏摇角度始终处于小幅波动状态。文献[18]认为风浪对船舶航行的干扰主要由周期为 5~20 s 的长波叠加组成。部分二阶波引起的振荡可以通过自动航向纠偏抵消, 而一阶波形引起的振荡和运动超出了自动驾驶仪的工作频带, 会引起自动驾驶设备的高频运动, 需要通过滤波的方式降低一阶波形的干扰。

船舶运动控制采取的滤波的方式主要有低通滤波、带通滤波、级联陷波滤波、基于观测器的滤波器等。虽然前述滤波可以降低风浪造成的干扰振荡, 但是存在“相位滞后”的问题。经仿真、实际使用, 发现此“相位滞后”极易引发系统振荡, 造成航行的不稳定。

卡尔曼滤波能够从噪声污染的测量信号中, 采用递归方式估计动态系统的真实状态, 有效地避免了“相位滞后”。在雷达、通讯、导航、目标跟踪领域被广泛使用。若系统离散状态方程为^[14,17]

$$\begin{cases} \mathbf{X}(k+1|k) = \Phi \mathbf{X}(k) + \Gamma \mathbf{W}(k) \\ \mathbf{Y}(k) = \mathbf{H} \mathbf{X}(k) + \mathbf{Z}(k) \end{cases} \quad (18)$$

式中 \mathbf{X} ——系统状态矩阵

Φ ——系统矩阵

\mathbf{H} ——观测矩阵 \mathbf{Y} ——系统输出

$\mathbf{W}(k)$ ——输入噪声

$\mathbf{Z}(k)$ ——观测噪声

Γ ——噪声驱动矩阵

其卡尔曼滤波增益的计算过程为:

(1) 状态一步预测

$$\hat{\mathbf{X}}(k+1|k) = \Phi \hat{\mathbf{X}}(k|k)$$

式中 $\hat{\mathbf{X}}$ ——系统状态估计

(2) 状态更新

$$\hat{\mathbf{X}}(k+1|k+1) = \hat{\mathbf{X}}(k+1|k) + \mathbf{K}_a(k+1) \boldsymbol{\varepsilon}(k+1)$$

其中 $\boldsymbol{\varepsilon}(k+1) = \mathbf{Y}(k+1) - \mathbf{H} \hat{\mathbf{X}}(k+1|k)$

式中 $\boldsymbol{\varepsilon}$ ——系统实际输出与观测估计输出的误差

\mathbf{K}_a ——卡尔曼滤波增益

(3) 滤波增益矩阵

$$K_a(k+1) = P(k+1|k)H^T(HP(k+1|k)H^T + R)^{-1}$$

式中 P ——协方差矩阵 R —— $Z(k)$ 的方差

(4) 一步预测协方差矩阵

$$P(k+1|k) = \Phi P(k|k) \Phi^T \Gamma Q \Gamma^T$$

式中 Q —— $W(k)$ 的方差

(5) 协方差阵更新

$$P(k+1|k+1) = (I_n - K_a(k+1)H)P(k+1|k)$$

式中 I_n ——单位对角阵

初始条件

$$\begin{cases} \hat{X}(0|0) = \mu_0 \\ P(0|0) = P_0 \end{cases}$$

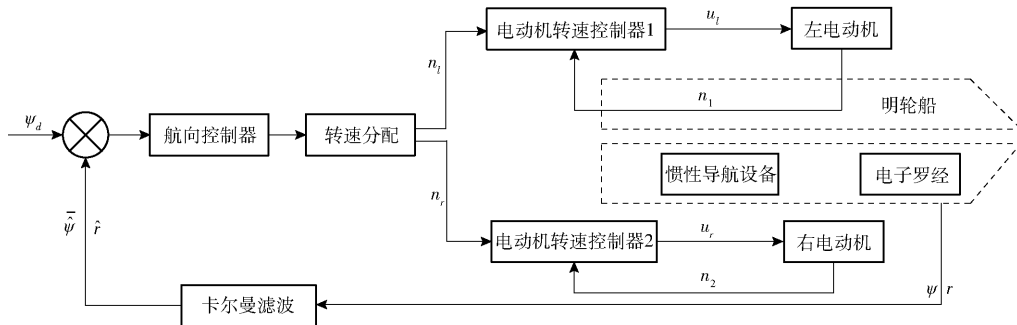


图1 艏摇角跟踪控制系统

Fig.1 Yaw angle tracking control system

电子罗经和惯性导航设备给出明轮船当前航向角 ψ 、艏摇角速度 r ，经卡尔曼滤波后进行负反馈，得到滤波降噪后的当前航向角 $\hat{\psi}$ 、艏摇角速度 \hat{r} ，航向控制器根据给出的目标航向角 ψ_d ，结合负反馈信号进行计算，经过左右明轮转速分配器分配后，得到左右明轮的各自转速 n_l 和 n_r 。左右电动机转速控制器根据给定的左右明轮的各自转速 n_l 和 n_r ，给出驱动左右电动机的信号 u_l 和 u_r ，驱动电动机。电动机的转速信号 n_1 、 n_2 经负反馈，形成转速闭环控制。据此推转左右明轮，驱动船体运动。

为验证算法有效性，使用 Matlab 软件进行计算机仿真测试。根据明轮船的试验艇参数，建立明轮船艏摇角动态响应模型^[10]。根据控制系统结构建立明轮船艏摇角仿真系统，如图2所示。



图2 明轮船艏摇角仿真系统

Fig.2 Paddle wheel ship yaw angle simulation system

根据上述仿真系统结构，将仿真程序输入 Matlab 计算机软件系统进行动态响应仿真，得到仿真结果。仿真过程中，使用正弦信号作为跟踪目标信号。对控制系统跟踪信号不仅有位置误差的要

式中 μ_0 ——系统状态初始值

P_0 ——协方差矩阵初始值

卡尔曼滤波将系统模型引入滤波过程，通过状态估计方差计算卡尔曼增益，反复迭代得到最优状态估计。且由于离散卡尔曼滤波不需要存储大量历史数据，适合计算机工作。明轮船的航迹跟踪和航向保持需使用二维卡尔曼滤波，故对艏摇角及艏摇角速度进行二维滤波。

4 控制系统结构与仿真

明轮船艏摇角跟踪控制系统的结构如图1所示。

求，还有速度误差的限制。不施加干扰时的跟踪效果如图3所示。

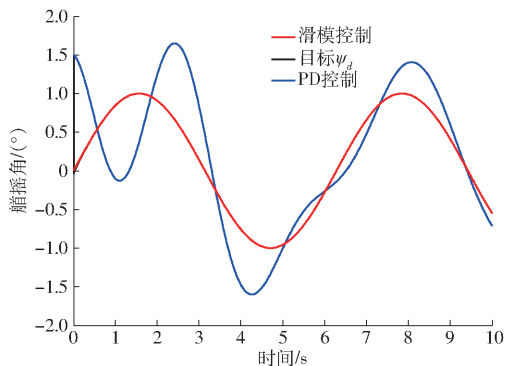


图3 无干扰跟踪效果

Fig.3 Tracking effect without interference

图3显示了明轮船艏摇角采用滑模控制方式与采取纯PD控制方式时船艏对目标偏航角的跟踪效果，二者差距显著。两种控制方式的初始状态角度是 1.5° 。跟踪目标信号是从 0° 开始的正弦信号。仿真结果显示离散滑模控制能够快速跟踪目标信号。由于滑模算法的快速跟踪特性，使得采取滑模算法时，控制信号在初始阶段存在短时间的过饱和现象，可以通过限制控制信号输出幅值的方式进行消减。PD控制对目标的跟踪是逐步逼近，振荡收敛，实现最终的跟踪效果慢了许多。

抗干扰检验时，在仿真系统的输出信号上施加

无量纲高斯噪声信号,得到在干扰下的艏摇角跟踪仿真结果,如图4、5所示。

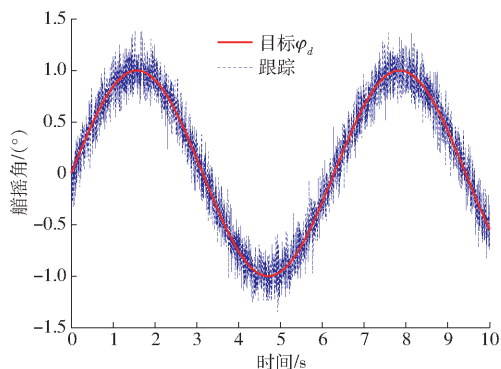


图4 有干扰跟踪仿真结果

Fig.4 Tracking effect with interference

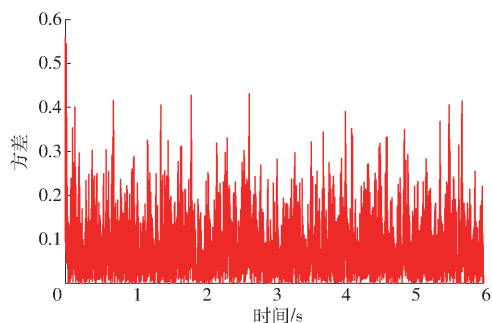


图5 有干扰跟踪仿真方差

Fig.5 Interference tracking simulation variance

仿真结果表明:离散滑模控制在高斯噪声干扰作用下,依然可以控制船艏进行航向跟踪,但是跟踪过程谐波较大,有干扰无滤波跟踪结果与目标信号的无量纲方差达到0.4。可以预见干扰会导致欠驱动系统明轮船艏做出幅度较大、频率较高的频繁控制动作。这对明轮船驱动设备、续航时间都会产生不利影响。

引入卡尔曼滤波降噪后的仿真结果表明,施加相同量级的高斯噪声干扰,跟踪信号的谐波幅值大幅度降低,如图6、7所示。

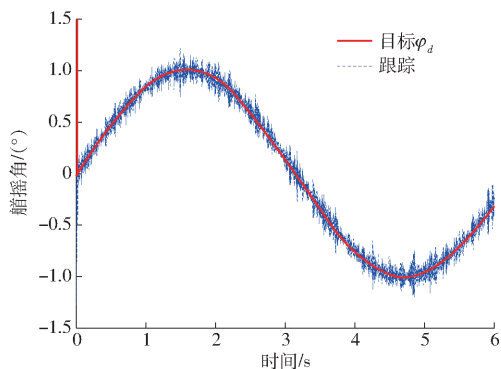


图6 有干扰滤波跟踪仿真结果

Fig.6 Interference filter tracking simulation results

经数据分析,在加入卡尔曼滤波之后,跟踪信号与目标信号的无量纲方差降低到0.18。显然,卡尔曼滤波的引入,对干扰起到了抑制与降低。这对于

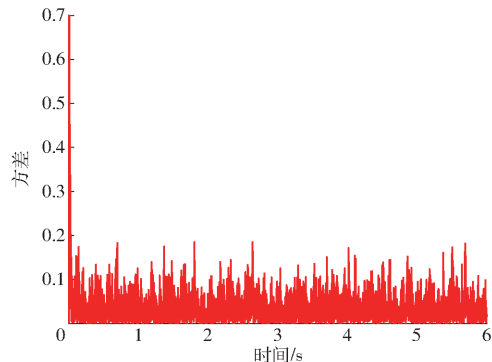


图7 有干扰滤波跟踪仿真方差

Fig.7 Interference filtering tracking simulation variance

明轮船延长续航时间、降低控制系统不必要的高频动作作用明显。

5 试验

为验证算法的可行性,采用实际样船进行算法适航性验证。经测量获取明轮船参数,计算相关水动力参数。试验明轮船见图8。



图8 明轮船样船

Fig.8 Paddle wheel ship

将离散滑模算法的控制代码输入控制系统,并反复进行调试、试验。试验当天多云,风力3~4级,气温15~24℃。得到转艏运动试验动态响应结果如图9所示。

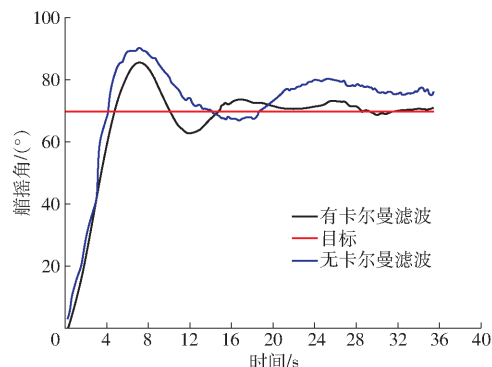


图9 转艏动态响应曲线

Fig.9 Dynamic response curves

试验曲线显示了明轮船转艏运动、直线运动的艏摇角动态变化过程。开始阶段是转艏运动,艏摇

角急速拉升。经图9的试验结果分析,离散滑模控制方式下偏航角的最大超调量较PD控制方式减小25%,调整时间减少50%。受制于明轮船转艏运动过程的艏摇角速度限幅和执行电机输出饱和限制的影响,转艏运动的快速性、超调量不及仿真效果,但是明轮船的直线跟踪效果达到预期,直线跟踪偏差效果见图10。

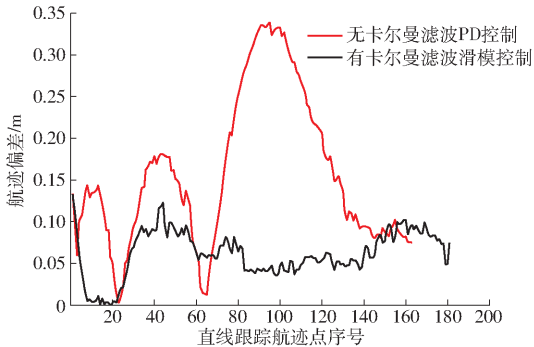


图10 明轮船直线跟踪偏差

Fig. 10 Paddle wheel ship linear tracking deviation

从图10可见,明轮船进入直线轨迹跟踪时,由于转艏运动,跟踪轨迹切换造成跟踪目标不定,致使明轮船刚进入直线段航迹点时出现较大偏差。随后,明轮船完全进入直线段目标轨迹区域航行,由于引入卡尔曼滤波滑模算法,直线跟踪偏差均在10 cm以内,达到直线跟踪目标要求。由于跟踪过程存在阵风干扰,明轮船被风力推向偏航。设计的滤波滑模控制算法进行了纠偏操作,使明轮船沿着目标轨迹航行。分析图10的试验数据,离散滑模控制实现的明轮船直线航迹在刚进入直线段时,快速逼近目标轨迹,在风浪干扰的作用下,最大偏差只是瞬间超过10 cm,其他时间段均低于10 cm,远优于

PD控制实现的效果。

无风浪干扰时,无卡尔曼滤波PD控制算法的跟踪精度虽然满足要求,但是收敛速度较慢。当出现风浪干扰时,明轮船出现较大的偏航,在无滤波的PD控制算法作用下,最终也能纠偏,但是航行过程的波动较大,最大偏差达到0.35 m,收敛到满足偏差要求的航迹时间也较长。实际航行试验表现为在目标航迹附近多次振荡。

有卡尔曼滤波的滑模航迹跟踪控制算法,在跟踪精度满足要求时,跟踪过程更加平稳,收敛速度更快。这对于明轮船工作过程的稳定性、节能降耗、延长续航时间起到重要作用。

6 结论

(1)采用离散滑模控制方式对明轮船的转艏运动进行控制。通过建立转艏运动模型,进行了离散滑模控制仿真,证明离散滑模算法可以对明轮船的转艏运动、直线跟踪进行有效控制。

(2)对干扰采取了卡尔曼滤波进行消减。仿真结果说明,卡尔曼滤波可以有效抑制航行过程中风力、波浪对航迹跟踪造成的干扰,对提升系统控制过程的平稳、节能降耗、延长续航起到重要作用。

(3)对算法进行了试验验证。转艏运动在算法控制下,均能实现直线跟踪。结果表明,采取基于卡尔曼滤波的滑模控制方式较PD控制,艏摇角的最大超调量比PD控制方式减小25%,调整时间减少50%,航迹偏差低于10 cm。由于转艏运动的角速度限幅、执行电机的饱和特性限制,明轮船的大角度转艏动态响应特性不及仿真效果,但目标轨迹跟踪效果达到预期。

参 考 文 献

- [1] 李建桥,张晓冬,邹猛,等. 中华绒螯蟹平面运动三维观测和步态分析[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 335-338. LI Jianqiao, ZHANG Xiaodong, ZOU Meng, et al. 3-D surveying and gaits analysis of Chinese mitten crab in smooth road[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 335-338. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2012s68&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.068. (in Chinese)
- [2] 孟祥宝,黄家桢,谢秋波,等. 基于自动巡航无人驾驶船的水产养殖在线监控技术[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 276-281. MENG Xiangbao, HUANG Jiayi, XIE Qiubo, et al. Online monitoring equipment for aquaculture based on unmanned automatic cruise boat[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 276-281. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150340&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.040. (in Chinese)
- [3] 胡金有,王靖杰,张小栓,等. 水产养殖信息化关键技术研究现状与趋势[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 251-263. HU Jinyou, WANG Jingjie, ZHANG Xiaoshuan, et al. Research status and development trends of information technologies in aquacultures[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 251-263. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150737&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.037. (in Chinese)
- [4] 史兵,赵德安,刘星桥,等. 工厂化水产养殖智能监控系统设计[J]. 农业机械学报, 2011, 42(9): 191-196.

- SHI Bing, ZHAO Dean, LIU Xingqiao, et al. Design of intelligent monitoring system for aquaculture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9):191-196. (in Chinese)
- [5] 颜波,石平.基于物联网的水产养殖智能化监控系统[J/OL].农业机械学报,2014,45(1):259-265.
YAN Bo, SHI Ping. Intelligent monitoring system for aquaculture based on internet of things[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1):259-265. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140140&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.040. (in Chinese)
- [6] 李道亮,傅泽田,马莉,等.智能化水产养殖信息系统的设计与初步实现[J].农业工程学报,2000,16(4):135-138.
LI Daoliang, FU Zetian, MA Li, et al. Design and development of intellectual aquacultural information system[J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(4):135-138. (in Chinese)
- [7] 巩沐歌,孟菲良,黄一心,等.中国智能水产养殖发展现状与对策研究[J].渔业现代化,2018,45(6):60-66.
GONG Muge, MENG Feiliang, HUANG Yixin, et al. Research on development status and countermeasures of intelligent aquaculture in China[J]. Fishery Modernization, 2018, 45(6):60-66. (in Chinese)
- [8] 孙月平,赵德安,洪剑青,等.河蟹养殖全覆盖自动均匀投饲的轨迹规划与试验[J].农业工程学报,2016,32(18):190-200.
SUN Yueping, ZHAO Dean, HONG Jianqing, et al. Trajectory planning and test for all coverage, automatic and uniform feeding in river crab aquaculture[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(18):190-200. (in Chinese)
- [9] 洪剑青,赵德安,孙月平,等.水产养殖无人导航明轮船运动仿真与试验[J/OL].农业机械学报,2016,47(3):124-130.
HONG Jianqing, ZHAO Dean, SUN Yueping, et al. Motion simulation and test of aquaculture unmanned navigation paddle wheel vehicle[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3):124-130. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160318&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.018. (in Chinese)
- [10] 洪剑青,赵德安,孙月平,等.水产养殖自动导航无人明轮船航向的多模自适应控制[J].农业工程学报,2017,33(1):95-101.
HONG Jianqing, ZHAO Dean, SUN Yueping, et al. Multi model adaptive control of paddlewheel vehicle's course in aquaculture[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1):95-101. (in Chinese)
- [11] 孙巧梅,陈金国,余万.基于模糊自适应滑模方法的AUV轨迹跟踪控制[J].舰船科学技术,2017,39(12):53-58.
SUN Qiaomei, CHEN Jinguo, YU Wan. Trajectory-tracking control of autonomous underwater vehicles based on fuzzy adaptive sliding mode method[J]. Ship Science and Technology, 2017, 39(12):53-58. (in Chinese)
- [12] 赵德安,罗吉,孙月平,等.河蟹养殖自动作业船导航控制系统设计与测试[J].农业工程学报,2016,32(11):181-188.
ZHAO Dean, LUO Ji, SUN Yueping, et al. Design and experiment of navigation control system of automatic operation boat in river crab culture[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(11):181-188. (in Chinese)
- [13] DAI X K, ZHANG J, LIU Z L, et al. Course keeping control of automatic operation boat with constraints for aquaculture[C]//IEEE 2018 37th Chinese Control Conference, 2018:4603-4608.
- [14] ZHANG Jun, SUN Tairen, ZHAO Dean, et al. Robust model predictive control of the automatic operation boats for aquaculture[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 142:118-125.
- [15] 丁永前,王致情,林相泽,等.自主跟随车辆航向控制系统[J/OL].农业机械学报,2015,46(1):8-13.
DING Yongqian, WANG Zhiqing, LIN Xiangze, et al. Heading control system of autonomous following vehicle[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1):8-13. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150102&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.002. (in Chinese)
- [16] 李道亮,包建华.水产养殖水下作业机器人关键技术研究进展[J].农业工程学报,2018,34(16):1-9.
LI Daoliang, BAO Jianhua. Research progress on key technologies of underwater operation robot for aquaculture[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(16):1-9. (in Chinese)
- [17] FOSSEN T I. Guidance and control of ocean vehicles[M]. Trondheim, Norway: John Wiley and Sons, Inc, 1994.
- [18] 孙宏放,彭秀艳,王金朋,等.船舶航向反步自适应控制[J].沈阳工业大学学报,2013,35(4):456-460.
SUN Hongfang, PENG Xiuyan, WANG Jinpeng, et al. Adaptive backstepping control for ship course[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2013, 35(4):456-460. (in Chinese)
- [19] TRISTAN P. Ship motion control course keeping and roll stabilisation using rdder and fins[M]. New York, NY: Springer Publishing Company, 2010.
- [20] KATSUHISA F. Sliding mode control of a discrete system[J]. Systems & Control Letters, 1990, 14(2):145-152.
- [21] CHAN C Y. Discrete adaptive sliding mode control of a state-space system with a bounded disturbance[J]. Automatica, 1998, 34(12):1631-1635.