



## 水产养殖车间运输无人车延迟特性的路径跟踪控制

曹守启\*, 隋国庆, 周国峰

(上海海洋大学工程学院, 上海 201306)

**摘要:** 为了提高水产养殖运输无人车在运送水产品过程中的路径跟踪准确性, 本研究提出了一种考虑延迟特性的高精度路径跟踪控制方法。首先, 对养殖车间内的无人车进行动力学分析, 搭建了无人车动力学模型; 其次, 将通信延迟和执行器延迟表述为纯滞后模块和一阶惯性延迟模型, 构建出延迟动力学模型; 通过模型预测控制 (MPC) 算法, 设计了适用于智能化养殖车间场景的控制器; 通过 MATLAB/Simulink 和 CarSim 搭建仿真平台, 并基于真实运输无人车和车间布局进行验证。结果显示, 本实验方法相较于不考虑延迟的 MPC 控制器、仅考虑执行器延迟的 MPC 控制器、考虑延迟的 LQR 控制器, 横向误差和航向角误差分别降低 96% 和 95% 以上、15% 和 34% 以上、5% 和 28% 以上。研究表明, 本实验方法面对延迟问题时具有较好的路径跟踪性能。本研究解决了水产养殖运输无人车存在的延迟问题, 路径跟踪精度得到提升, 保证了养殖车间内无人车运输的准确性和安全性。

**关键词:** 无人车; 水产养殖运输; 智慧养殖; 转向延迟; 模型预测控制

**中图分类号:** S 969; U 467.1

**文献标志码:** A

在智慧渔业和无人驾驶的背景下, 水产养殖车间实现智能化和无人化能够提高生产效率, 减少运营成本, 确保养殖过程更具持续性和可控性<sup>[1-3]</sup>。如今, 无人车的参与使养殖过程中饲料的搬运、成鱼和鱼苗的转移、各种设备的运送等更加便捷, 但无人运载车辆在运行过程中, 需要面对信息传输慢导致的通信延迟、转向系统中机械结构间相互作用带来的执行器延迟。延迟会导致无人车无法准确跟踪期望路径, 在狭窄和复杂的养殖车间内发生安全事故<sup>[4-7]</sup>。为此, 本实验对水产养殖运输无人车的延迟问题进行研究。

针对无人车在自身信号处理和传输过程中存在的通信延迟现象, Jo 等<sup>[8]</sup>提出了一种基于分布式架构的自动驾驶系统, 具有降低计算复杂性、容错特性和系统模块化等优点, 在智能化养殖车间信息传输方面具有一定优势。Berntorp 等<sup>[9]</sup>聚焦

于自动驾驶车辆的控制架构设计, 涉及到车载软件的优化和传感器数据的处理, 对水产养殖运输无人车通信传输效率有一定的提升。Wang 等<sup>[10]</sup>通过对巡航控制系统存在的通信延时进行分析, 开发了一种基于深度确定性策略梯度 (DDPG) 的互联巡航控制智能算法, 以补偿通信延迟导致的控制器性能下降。除此之外, 针对车辆中存在的机械结构间的相互作用而导致的惯性延迟, 吕颖等<sup>[11]</sup>通过线性二次型调节器 (LQR) 技术和一阶惯性模型补偿转向动作带来的延迟, 并引入前馈控制律来补偿车辆转弯时的误差, 为养殖车间内运输无人车处理延迟问题提供了解决思路。Lei 等<sup>[12]</sup>在其研究中通过车辆执行器求解出阶跃响应曲线, 基于运动学模型实现具有延迟补偿的无人车的模型预测控制 (MPC) 技术, 以解决无人车转向延迟问题。张亮修等<sup>[13]</sup>提出了一种误差校正机制的智

收稿日期: 2024-07-25 修回日期: 2024-11-20

资助项目: 上海市农业科技创新项目 (沪农科 I2023006); 上海市崇明区农业科创项目 (2021CNKC-05-06)

通信作者: 曹守启 (照片), 从事海洋物联网工程、渔业工程及其自动化研究, E-mail: sqcao@shou.edu.cn



能车辆路径跟踪鲁棒预测控制方法, 这种方法通过对未来轨迹的预测和当前误差的校正, 对于水产养殖车间这种复杂驾驶环境也能保持一定路径精确度。但以上研究仅单独针对通信延迟或执行器延迟进行分析, 未能对转向过程中存在的两种延迟同时分析, 可能会出现控制精度下降的现象。

本实验针对水产养殖运输中无人车存在的转向延迟问题, 提出了一种高精度的路径跟踪控制策略。通过对无人车力学分析, 搭建了动力学模型。将运载车辆转向过程中的通信延迟和执行器延迟分别表述为纯滞后模块和一阶惯性延迟模型, 并耦合构建了延迟动力学模型。基于此模型设计了适用于养殖车间场景的模型预测控制器, 实现对规划路径的高精度轨迹跟踪控制。通过 MATLAB/Simulink 和 CarSim 联合仿真, 在不同工况下, 对满载和空载以及随意载荷进行测试。结果显示, 本实验方法在处理转向延迟问题上具有显著优势, 提高了养殖车间内无人车运输的准确性和安全性。

## 1 无人车动力学模型搭建

### 1.1 三自由度动力学模型

针对水产养殖车间内真实的水产品无人运输车, 多为平板车造型(图1)<sup>[14-15]</sup>。通过对其进行动力学分析, 建立了单轨三自由度车辆模型作为轨迹跟踪控制模型(图2)。



图1 养殖车间内水产品运输车

Fig. 1 Aquaculture workshop aquatic products transport vehicle

根据力平衡和扭矩平衡, 可以得出平衡方程:

$$\begin{cases} m(\dot{v}_x - v_y\dot{\varphi}) = F_{xf}\cos(\delta_f) - F_{yf}\sin(\delta_f) + F_{xr} \\ m(\dot{v}_y + v_x\dot{\varphi}) = F_{xf}\sin(\delta_f) + F_{yf}\cos(\delta_f) + F_{yr} \\ I_z\ddot{\varphi} = l_f[F_{xf}\sin(\delta_f) + F_{yf}\cos(\delta_f)] - l_rF_{yr} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $m$ 为车辆整重量(kg);  $v_x$ 为车体坐标系下质心的纵向速度(m/s);  $v_y$ 为车体坐标系下质心的侧向速度(m/s);  $l_f$ 为车辆质心到前轴的距离(m);  $l_r$ 为车辆质心到后轴的距离(m);  $\delta_f$ 为车辆前轮转

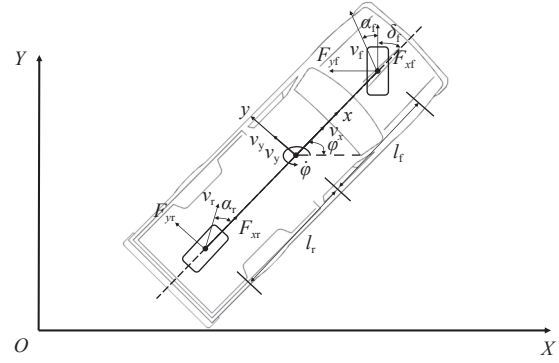


图2 单轨三自由度车辆模型

Fig. 2 Monorail three degree of freedom vehicle model

角(deg);  $I_z$ 为车辆转动惯量( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ );  $\varphi$ 为横摆角(deg);  $F_{yf}$ 为车辆前轮所受侧向力(N);  $F_{yr}$ 为车辆后轮所受侧向力(N);  $F_{xf}$ 为车辆前轮所受纵向力(N);  $F_{xr}$ 为车辆后轮所受纵向力(N)。

考虑到养殖车间内环境的特殊性和复杂性, 对动力学建模过程作出以下假设:

①水产品运输车通常为重载运输设计, 具有较高的稳定性和较大的重量。这种设计使得在正常运行条件下, 车辆的转向系统被设计为不易于做出大的转向角度调整, 以保持车辆稳定和安全。故车辆的转向角 $\delta_f$ 通常较小, 可推出 $\cos(\delta_f) \approx 1$ ,  $\sin(\delta_f) \approx \delta_f$ ,  $\tan(\delta_f) \approx \delta_f$ 。当转向角度较小时, 前轮轮胎所受的横向力 $F_{xf}$ 的正弦分量 $F_{xf}\sin(\delta_f)$ , 尤其相对于 $F_{xf}\cos(\delta_f)$ 而言, 对车辆的总横向动力学影响不大。从而假设 $F_{xf}\sin(\delta_f) \approx 0$ 。

②在实际运输中, 养殖车间运载车辆通常按照相对恒定的速度行驶。因此本实验侧重于研究运载车辆的转向动态和横向位移, 纵向动力学不是研究重点, 设纵向速度 $v_x$ 恒定, 即 $\dot{v}_x \approx 0$ 。

基于以上假设, 公式(1)可以写成(2):

$$\begin{cases} \dot{v}_x = v_y \cdot \dot{\varphi} + \frac{F_{xf}\cos(\delta_f) + F_{yf}\sin(\delta_f) + F_{xr}}{m} \\ \dot{v}_y = \frac{F_{yf}\cos(\delta_f) + F_{yr}}{m} - v_x \cdot \dot{\varphi} \\ \ddot{\varphi} = \frac{l_f F_{yf}\cos(\delta_f) - l_r F_{yr}}{I_z} \end{cases} \quad (2)$$

由于 $F_{yf}$ 与前轮转向角 $\delta_f$ 有关, 本实验是针对转向延迟进行设计, 且 $F_{yf}$ 包含前轮转角 $\delta_f$ , 因此 $F_{yf}$ 用函数形式 $F_{yf}(\delta_f)$ 进行表达。得到仅考虑横向动力学的二自由度车辆动力学模型:

$$\begin{cases} \dot{v}_y = \frac{F_{yf}(\delta_f) + F_{yr}}{m} - v_x \cdot \dot{\varphi} \\ \dot{\varphi} = \frac{l_f F_{yf}(\delta_f) - l_r F_{yr}}{I_z} \end{cases} \quad (3)$$

为了维持车辆的稳定性, 运载车辆会以较低的速度行驶且转弯时不会进行急转, 保证了轮胎较小的侧偏角。养殖车间内地面可能无法保持绝对平整, 尤其在潮湿环境下, 地面容易出现积水、凹凸不平的现象, 产生各种非线性影响。针对公式(3)中车辆动力学模型中的非线性特征, 其主要来自轮胎非线性区的轮胎力, 根据线性化轮胎公式, 轮胎上的侧向力可以近似为轮胎侧偏角的线性函数:

$$\begin{cases} F_{yf} = \bar{C}_{\alpha_f} \alpha_f(\delta_f) \\ F_{yr} = \bar{C}_{\alpha_r} \alpha_r \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $\bar{C}_{\alpha_f}$ ,  $\bar{C}_{\alpha_r}$ 为前后轮胎的线性侧偏刚度。其中,  $\alpha_f$ 的求解中也包含对前轮转角 $\delta_f$ 的计算, 同理 $\alpha_r$ 也用 $\alpha_f(\delta_f)$ 函数形式表达。

考虑到车辆的偏航运动, 质心前方 $l_f$ 处的横向速度可以表示为 $v_y + l_f r$ , 前轮的实际运动方向相对于车辆纵轴的角度可以用 $\arctan\left(\frac{v_y + l_f r}{v_x}\right)$ 表示。由于前轮已经通过转向角 $\delta_f$ 指向了某个方向, 实验需要从实际运动方向中减去这个转向角, 以得到相对于车轮几何方向的侧偏角 $\alpha_f$ 。同时基于轮胎较小的侧偏角, 得到公式:

$$\begin{cases} \alpha_f(\delta_f) = \arctan\left(\frac{v_y + l_f r}{v_x}\right) - \delta_f \approx \frac{v_y + l_f \dot{\varphi}}{v_x} - \delta_f \\ \alpha_r = \arctan\left(\frac{v_y - l_r r}{v_x}\right) \approx \frac{v_y - l_r \dot{\varphi}}{v_x} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $\alpha_f$ 和 $\alpha_r$ 为前、后轮侧偏角。

## 1.2 跟踪误差模型

自动驾驶车辆对参考路径进行跟踪控制时, 需要考虑车辆当前状态与期望路径之间的位姿偏差关系(图3)。主要存在两种偏差, 即车辆质心位置与其在道路中心线上的投影点之间的距离偏差为 $e_d$ , 车辆实际行进方向与给定路径之间的角度差异为 $e_\varphi$ 。根据图3所示的几何关系, 可以得出:

$$\begin{cases} e_d = -(Y_c - Y_r) \cos(\varphi_r) + (X_c - X_r) \sin(\varphi_r) \\ e_\varphi = \varphi - \varphi_r \end{cases} \quad (6)$$

假设车辆质心位置在道路中心线上的投影点

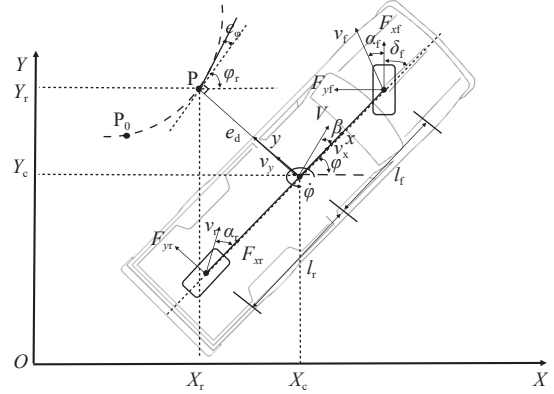


图3 跟踪误差模型

Fig. 3 Tracking error model

为 $P$ , 定义 $s$ 为 $P$ 与道路中心线上的某参考点 $P_0$ 之间的弧长, 且 $\kappa = 1/R$ 为 $P$ 点处的曲率。车辆沿参考路径的切线速度可以通过在路径切线方向的投影获得, 即 $v_x \cos(e_\varphi) + v_y \sin(e_\varphi)$ 。由于车辆在曲线路径运动, 当考虑曲率对切线速度的影响时, 需要通过 $1 - \kappa e_d$ 来修正这个速度,  $\kappa$ 为参考路径点处的曲率。则:

$$\dot{s} = \frac{1}{1 - \kappa e_d} [v_x \cos(e_\varphi) + v_y \sin(e_\varphi)] \quad (7)$$

对等式(6)两边求导得到:

$$\dot{e}_\varphi = \dot{\varphi} - \dot{\varphi}_r = \dot{\varphi} - \kappa \dot{s} \quad (8)$$

车辆横向偏差的变化率由车辆质心处速度在偏差方向的投影求得:

$$\dot{e}_d = v_x \sin e_\varphi + v_y \cos e_\varphi \quad (9)$$

因此, 车辆跟踪误差模型公式:

$$\begin{cases} \dot{e}_d = v_x \sin e_\varphi + v_y \cos e_\varphi \\ \dot{e}_\varphi = \dot{\varphi} - \kappa \frac{v_x \cos e_\varphi - v_y \sin e_\varphi}{1 - \kappa e_d} \end{cases} \quad (10)$$

## 2 考虑延迟的无人车路径跟踪控制器设计

通过对养殖车间的运输无人车进行测试, 分别对系统和执行器输入正弦信号和阶跃信号, 并拟合出执行器阶跃响应曲线和实际转向与参考转向曲线, 从而求解出系统执行器和通信的具体的延迟时间。本研究中皆为已知具体延迟时间的系统。根据实验得到的曲线, 将执行器阶跃响应曲线表征为一阶惯性延迟模型。因此, 本实验对车辆执行器采用一阶惯性延迟模型进行拟合:

$$\delta_f^{\text{real}} = \frac{1}{\tau_{st}s + 1} \delta_f^{\text{pre}} \quad (11)$$

式中,  $\delta_f^{\text{real}}$  为前轮实际转角;  $\delta_f^{\text{pre}}$  为前一时刻目标前轮转角;  $\tau_{\text{st}}$  为惯性时间常数, 代表车辆执行器延迟时间。

在拉普拉斯变换域中, 延迟环节可以用以下传递函数  $G(s)$  表示,

$$G(s) = \frac{1}{\tau_{\text{st}}s + 1} \quad (12)$$

由此可以得到:

$$\delta_f^{\text{real}} = \frac{1}{\tau_{\text{st}}s} (\delta_f^{\text{pre}} - \delta_f^{\text{real}}) \quad (13)$$

为了同时处理纯滞后环节, 需要在执行模型预测控制算法以计算最优控制输入之前, 采用动态模型和历史数据对车辆的未来状态进行预测, 涉及到对车辆的位置、航向角等关键状态变量的估计。将得到的预测状态序列设定为模型预测控制问题的初始状态, 并在此状态的基础上进行优化分析, 计算出最优的控制指令。因此, 纯滞后环节表征为:

$$\delta_e \xrightarrow{\tau} \delta_e(t - \tau) \quad (14)$$

$\tau$  为滞后时间, 表示通信过程中存在的延迟时间。在拉普拉斯变换域中, 延迟环节可以用以下传递函数  $G(s)$  表示,

$$G(s) = e^{-\tau s} \quad (15)$$

基于以上分析, 将通信延迟导致的时间滞后以及执行器滞后二者耦合表述, 得到同时考虑两种延迟的模型为:

$$\delta_f^{\text{real}}(t) = \frac{1}{\tau_{\text{st}}} [\delta_f^{\text{pre}}(t - \tau) - \delta_f^{\text{real}}(t)] \quad (16)$$

此方程表明, 转向角度的变化率是由转向预设指令和当前车轮转向位置的差值除以时间常数来确定的。即这个变化率描述了系统如何动态响应以达到预设的方向盘位置。

综合以上过程分析, 得到考虑转向延迟特性的水产养殖运输无人车路径跟踪控制系统模型:

$$\begin{cases} \dot{e}_d = v_x \sin e_\varphi + v_y \cos e_\varphi \\ \dot{e}_\varphi = \varphi - \kappa \dot{s} \\ \dot{v}_y = \frac{F_{yf}(\delta_f) + F_{yr}}{m} - v_x \dot{\varphi} \\ \ddot{\varphi} = \frac{l_f F_{yf}(\delta_f) - l_r F_{yr}}{I_z} \\ \delta_f^{\text{real}}(t) = \frac{1}{\tau_{\text{st}}} \delta_f^{\text{pre}}(t - \tau) - \frac{1}{\tau_{\text{st}}} \delta_f^{\text{real}}(t) \end{cases} \quad (17)$$

将以上公式用状态空间方程形式表示, 即:

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (18)$$

式中, 状态变量  $x = [e_d \ \dot{e}_d \ e_\varphi \ \dot{e}_\varphi \ \delta_f^{\text{pre}} \ \delta_f^{\text{real}}]^T$ , 控制量  $u = \Delta\delta_f$ 。  $\Delta\delta_f$  为前轮转角的修正量。连续时间系统和离散时间系统下分别为:

$$\dot{x} = \bar{A}x + \bar{B}u \quad (19)$$

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (20)$$

式中,  $A \in R^{6 \times 6}$ ,  $B \in R^{6 \times 1}$ 。为避免被控车辆的控制变量突变导致控制量不连续, 快速且平稳地跟踪期望路径, 采用二次型的目标函数来进行优化求解, 控制器代价函数设置如下:

$$J = [Y_{\text{ref}}(k) - Y(k)]^T \bar{Q} [Y_{\text{ref}}(k) - Y(k)] + \Delta U(k)^T \bar{R} \Delta U(k) \quad (21)$$

$Y_{\text{ref}}(k) = [y_{\text{ref}}(k+1|k), y_{\text{ref}}(k+2|k), \dots, y_{\text{ref}}(k+N_p|k)]$ 。代价函数  $J$  是预测优化目标在时域内的累积和, 可以表示:

$$J_{\min} = \sum_{k=1}^N (J_{ed,k} + J_{ed,k} + J_{e\varphi,k} + J_{e\varphi,k} + J_{\delta_f^{\text{real}},k}) + \sum_{k=0}^{N-1} J_{\Delta\delta_f,k} \quad (22)$$

式中,  $\bar{Q}$  和  $\bar{R}$  为权重矩阵,  $N_p$  为预测步长,  $N_p = 30$ 。  $N_c$  为控制步长,  $N_c = 20$ 。  $Row$  为松弛因子, 初始值设为 10, 通过系统迭代仿真, 逐步调整  $Row$  使得目标参数  $x$  满足约束条件, 并使目标函数  $J$  达到最优。  $T$  代表采样时间。考虑到养殖车间运载车辆的实际工况主要有满载和空载两种情况, 针对这两种情况, 可以将车辆的控制参数进行控制参数的切换, 确保控制器在不同载荷条件下均能保持优良的控制性能。

由于养殖车间内存在各种复杂的仪器设备, 为了保证养殖车间无人车运行时保持在规定的边界内, 避免因偏离道路而对车间内的设备造成损害, 须对横向误差进行约束:

$$e_{d,\min} \leq e_d \leq e_{d,\max} \quad (23)$$

考虑到养殖车间运载车辆会因过快或过激烈的转向响应导致车辆的控制失稳, 车辆稳定性下降, 出现连续转向或振荡现象。须对前轮角度和前轮角度变化率增加约束条件限制:

$$\delta_{f,\min} \leq \delta_f \leq \delta_{f,\max} \quad (24)$$

$$\dot{\delta}_{f,\min} \leq \dot{\delta}_f \leq \dot{\delta}_{f,\max} \quad (25)$$

考虑延迟特性的水产养殖运输无人车路径跟踪控制器的整体设计架构 (图 4), 搭建的动力学模

型包括了纯滞后和一阶惯性延迟模型, 模型预测控制器基于此动力学模型对无人车进行轨迹跟踪控制。控制流程包括首先获取车辆状态信息和参

考路径点, 并通过模型预测控制器计算出前轮转角的修正量 $\Delta\delta_f$ 。将修正量 $\Delta\delta_f$ 与上一时刻前轮转角 $\delta_f^{pre}$ 融合传递后传递给 CarSim 仿真车辆。

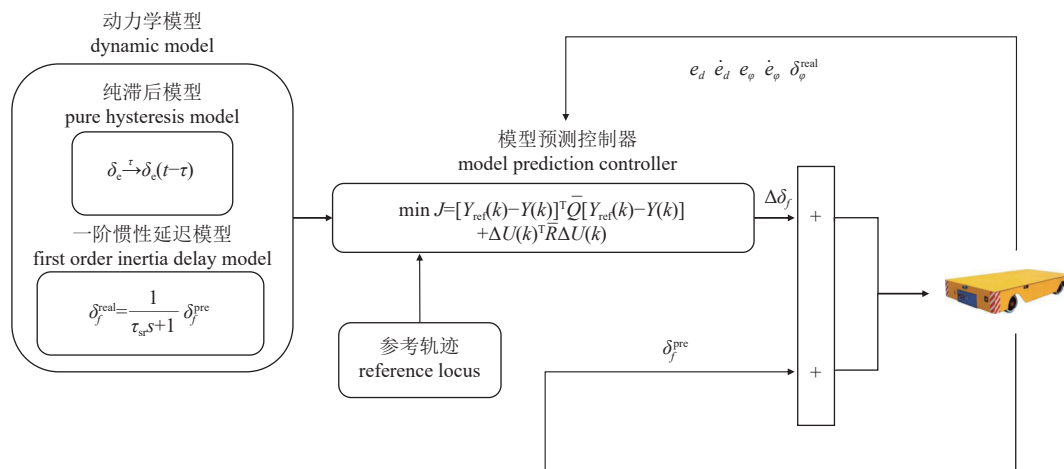


图 4 程序框架设计

Fig. 4 Program framework design

### 3 验证实验

#### 3.1 仿真工作

由于无人车需要运载的特点, 运载前后质量差距较大, 此时车辆质心位置、侧偏刚度等参数也会发生相应变化, 因此需要采集无人车在满载和空载两种状态下的车辆参数。为获取两种状态下车辆的参数, 在 CarSim 中进行了“∞”形工况试验, 在收集了相关数据后利用 MATLAB 参数估计工具箱进行参数辨识, 得到整车满载和空载两种状态的参数分别如表 1 和表 2 所示。

由于 CarSim 仿真中不存在延迟问题, 为了体现延迟的存在, 同时尽可能地接近车辆真实的延迟情况, 因此在 Simulink 模型中增加模拟纯滞

后和一阶惯性延迟的模块。为了体现路面不平度带来的影响, 在 MATLAB/Simulink 中生成白噪声和高斯噪声, 并将噪声数据作为路面高度数据的一部分导入 CarSim 中, 用来模拟路面不平整而产生的各种非线性因素。仿真流程 (图 5) 采用时间常数 $\tau_{st} = 0.1$  s 的一阶惯性延迟模型以及滞后时间 $\tau = 0.15$  s 的纯滞后环节。

通过对真实水产养殖车间 (图 6) 进行调研, 基于车间内部具体布局设计仿真工况, 最终选择了常见的且延迟现象明显的两种工况, 分别为 A: “C”形转弯工况; B: “S”形工况。

仿真设计方面, 为了验证所提出控制方法对处理转向延迟的有效性, 设计了①无转向延迟特性补偿的模型预测控制器 (NMPC) 作为对比来体

表 1 满载车辆参数

Tab. 1 Full load vehicle parameters

参数 parameters	数值 numerical value
整车质量/kg $m$ vehicle mass	1 597
质心距前轴距离/m $L_f$ distance from center of mass to front axis	1.017
质心距后轴距离/m $L_r$ distance from center of mass to rear axis	1.033
前轮侧偏刚度/(N/rad) $C_f$ front wheel side stiffness	117 559
后轮侧偏刚度/(N/rad) $C_r$ rear wheel side stiffness	116 991
横摆转动惯量/(kg · m) $I_z$ yaw moment of inertia	2 145

表 2 空载车辆参数

Tab. 2 No load vehicle parameters

参数 parameters	数值 numerical value
整车质量/kg $m$ vehicle mass	597
质心距前轴距离/m $L_f$ distance from center of mass to front axis	0.98
质心距后轴距离/m $L_r$ distance from center of mass to rear axis	1.07
前轮侧偏刚度/(N/rad) $C_f$ front wheel side stiffness	67 559
后轮侧偏刚度/(N/rad) $C_r$ rear wheel side stiffness	66 991
横摆转动惯量/(kg · m) $I_z$ yaw moment of inertia	1 031

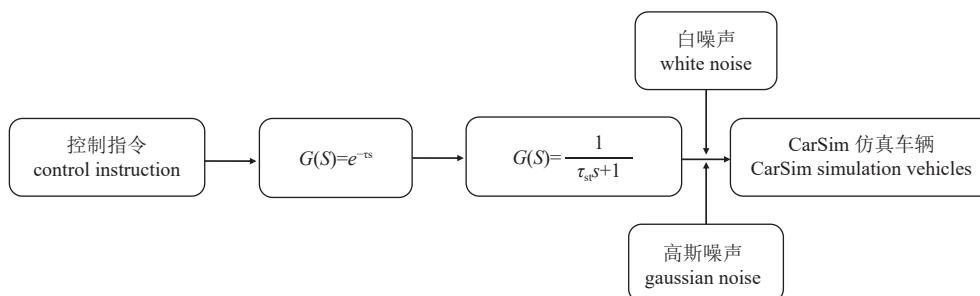


图 5 仿真测试流程

Fig. 5 Simulation test process

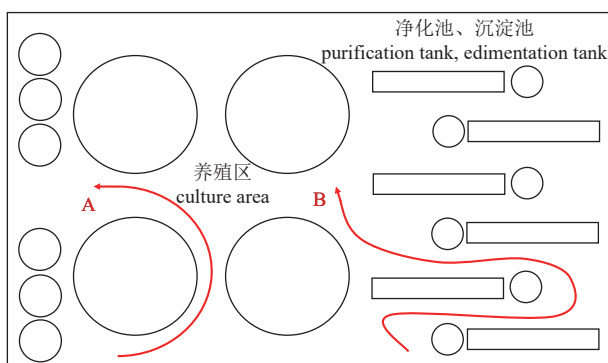


图 6 水产养殖车间图(局部)

Fig. 6 Aquaculture workshop map (partial)

现考虑转向延迟的重要性；为了展示同时考虑两种延迟相对于只考虑一种延迟的准确性更高，设计了②仅考虑执行器延迟的模型预测控制 (NMPC) 来体现同时考虑两种延迟的重要性；为了体现本实验控制方法的精准度，与当前较常用的 LQR 处理转向延迟的方法进行对比，设计了③考虑转向延迟的线性二次型调节器 (LQR) 作为对比来体现模型预测控制器在处理延迟问题中的精确性。

考虑到水产养殖车间内，无人车的车速不宜过高，因此本实验设定测试车速为 5 km/h。通过满载状态下“C”形工况和空载状态下“S”形工况进行测试，以便多角度地验证所提出控制算法的有效性。

### 3.2 工况 A：“C”形工况实验

图 7-b 表明不考虑转向延迟特性补偿的非线性模型预测控制器在该速度下的最大横向误差为 6 m，且存在晃动现象，可能会与养殖设备发生碰撞，造成较大安全隐患。图 7-c 仅考虑执行器延迟的非线性模型预测器最大横向误差约 0.5 m，控制精度还需要提升。图 7-d 考虑转向延迟的线性二次型调节器最大横向误差约 0.08 m，而图 7-a 考虑转向延迟的非线性模型预测控制器最大横向误差约 0.07 m，且不存在明显的晃动现象。

图 8-b 无转向延迟特性补偿的控制器最大航向角误差超过了 30°，且存在明显的晃动现象。而图 8-a 考虑转向延迟特性的非线性模型预测控制器航向角误差在 1.5° 内。图 8-c 仅考虑执行器延迟的非线性模型预测器最大航向角为 10.3° 左右，误差尚不符合智能化养殖车间的要求。图 8-d 线性二次型调节器航向角误差在 2.8° 内 (表 3)。

### 3.3 工况 B：“S”形工况实验

图 9-b 不考虑转向延迟特性补偿的非线性模型预测控制器在该速度下的最大横向误差约 3 m，同样存在晃动现象。图 9-a 考虑转向延迟的非线性模型预测控制器最大横向误差 0.07，且不存在明显的晃动现象。图 9-c 仅考虑执行器延迟的非线性模型预测控制器最大误差约 0.48 m，在仿真中精度尚不符合无人车高精度的要求。图 9-d 考虑转向延迟的线性二次型调节器最大横向误差 0.08 m。

图 10 表明了三者的航向角误差，图 10-b 无转向延迟特性补偿的控制器最大航向角误差为 18°，且存在明显的晃动现象。而图 10-a 考虑转向延迟特性的非线性模型预测控制器最大航向角误差约 1.2°，图 10-c 仅考虑执行器延迟的非线性模型预测控制器最大航向角误差约 9.8°，图 10-d 线性二次型调节器最大航向角误差约 1.8° (表 4)。

### 3.4 随意载荷

考虑到养殖车间内的工作内容和运输任务多样化。可能需要运送不同种类的饲料、水产及设备搬运等工作，这会导致无人车负荷随意变化。在对无人车的随意载荷状态进行分析时，无法做到从空载到满载下的每一个重量进行测试，因此通过分析车辆的动力学特性，将 1 000 kg 的载重能力按等间隔划分，每 100 kg 作为一个梯度，共 10 个重量区间，每个区间内所采用的车辆参数和

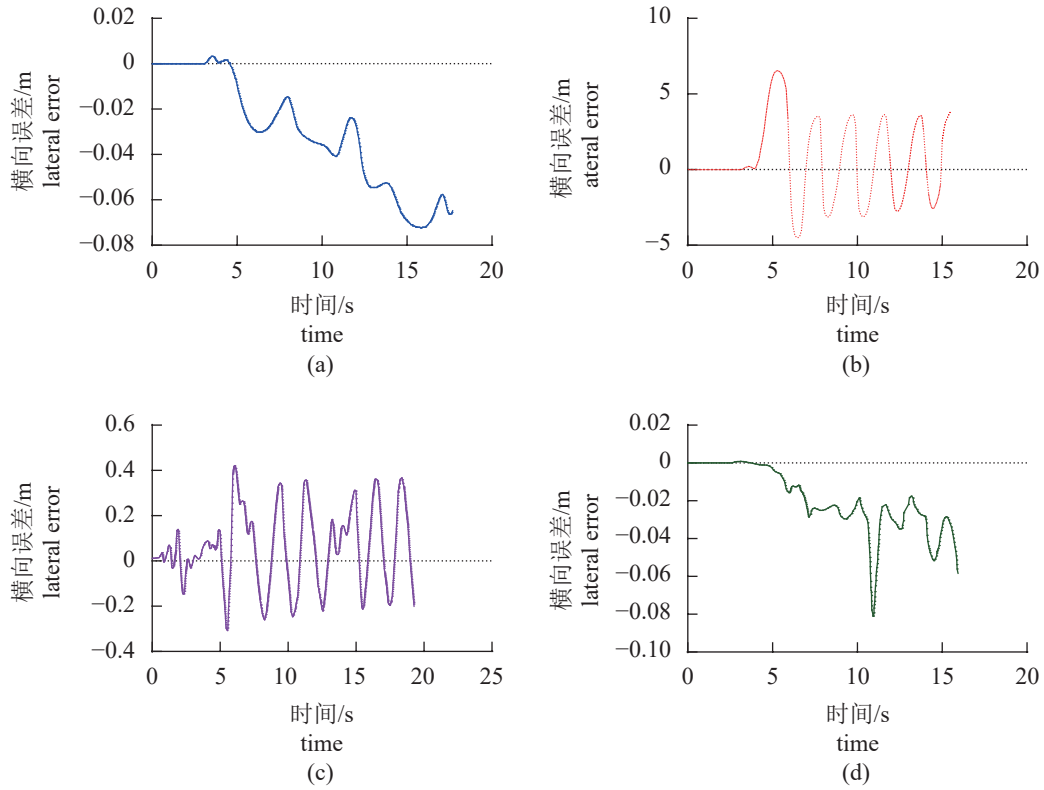


图7 “C”形转弯工况横向误差  
 Fig. 7 Lateral error in "C" shape turning condition

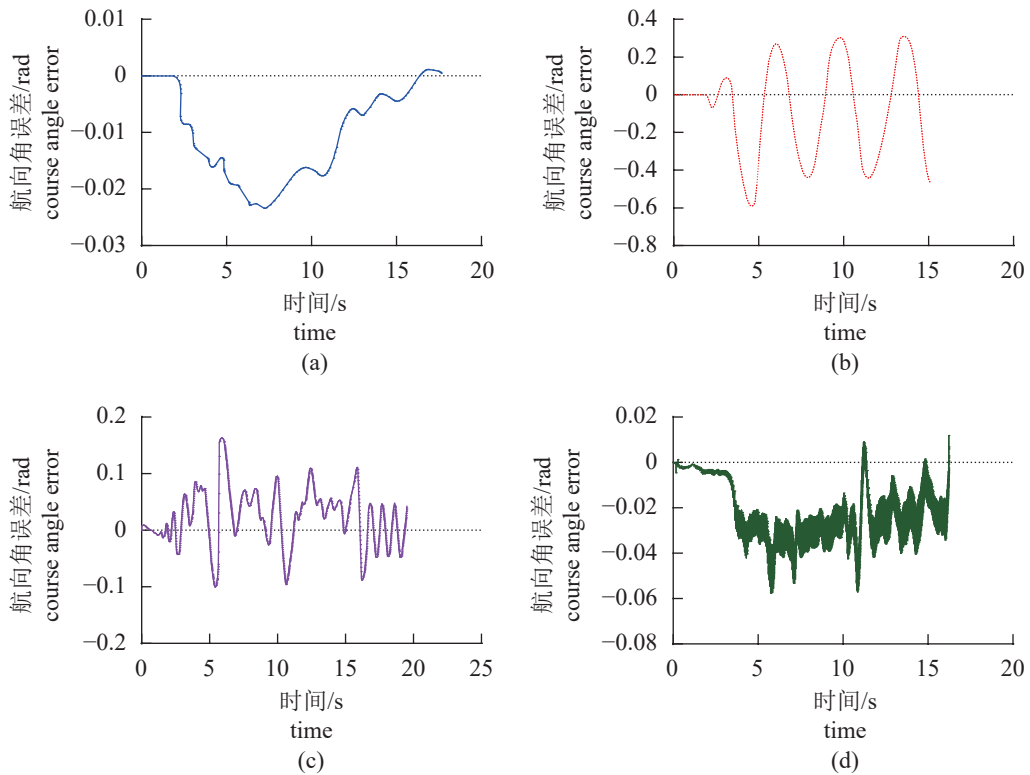


图8 “C”形转弯工况航向角误差  
 Fig. 8 Heading angle error in "C" shape turning condition

表3 “C”形轨迹测试结果

Tab. 3 Test results of "C" shaped trajectory

类型 type	本实验方法 textual method	对比① comparison ①	对比② comparison ②	对比③ comparison ③
最大横向误差/m maximum lateral error	0.07	6.00	0.50	0.08
横向误差均方根误差 lateral error root mean square error	0.035 3	2.702 0	0.075 4	0.039 2
改善效果 improve the effect	\	96	53	10
最大航向角误差/deg maximum course angle error	1.5	30.0	10.3	2.8
航向角误差均方根误差 course angle error root mean square error	0.013 4	0.268 0	0.022 7	0.025 3
改善效果 improve the effect	\	95	59	47

注：“\”代表无改善效果，下同。

Notes: "\" represents no improvement effect, the same below.

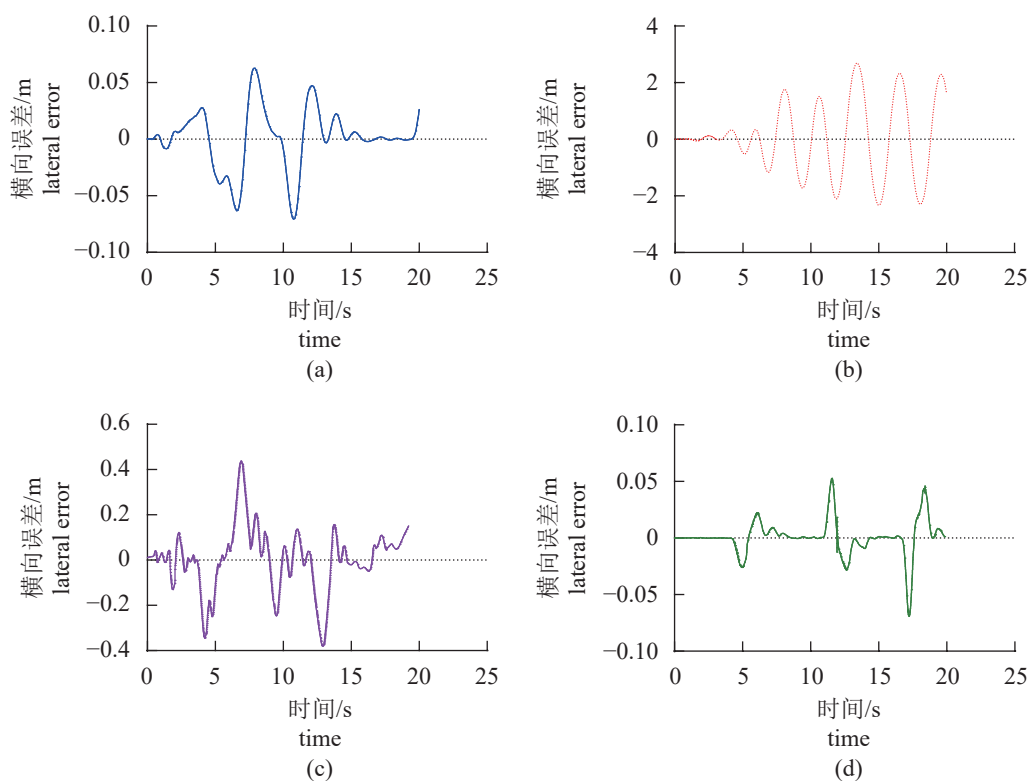


图9 “S”形转弯工况横向误差

Fig. 9 Lateral error in "S" shape turning condition

控制器参数相同，同时每个重量区间内，测得无人车延迟时间基本保持一致。这样既能捕捉到重量变化带来的动力学性能差异，又不会增加过多的分析复杂性。测试结果与前面所得出的精度进行对比，面对所设计的10个重量梯度区间，无人车所表现的控制精准度与满载和空载状态相差10%以内(表5, 表6)。这表明梯度区间设置为合理，且控制器能够有效处理运载中的随意

载荷。

根据以上数据，对最大、最小及平均横向误差和航向角误差做出误差棒图，用来表示整组数据的变异性与稳定性，误差棒长度均匀，误差较小，数据稳定，离散型小，可信度高。图11-a和图11-b表示“C”形轨迹工况下，各重量区间的精准度散点图；图11-c和图11-d表示“S”形轨迹工况下，各重量区间的精准度散点图。



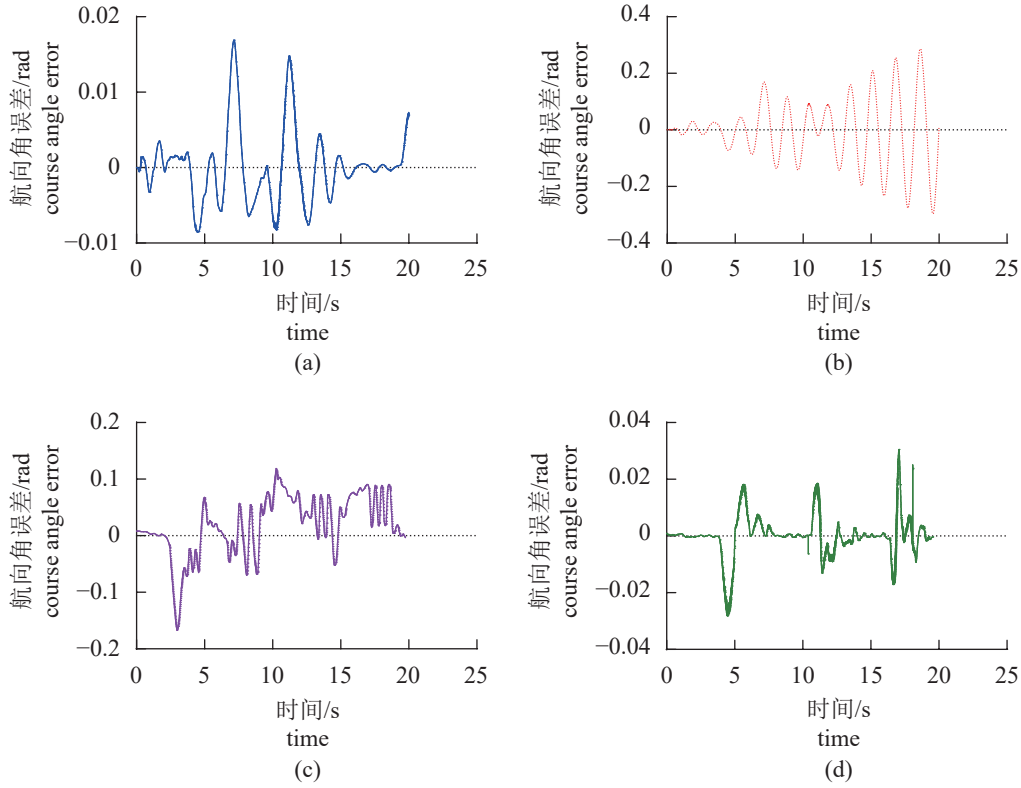


图 10 “S”形转弯工况航向角误差

Fig. 10 Heading angle error in "S" shape turning condition

表 4 “S”形轨迹测试结果

Tab. 4 Test results of "S" shaped trajectory

类型 type	本实验方法 method in this study	对比① comparison ①	对比② comparison ②	对比③ comparison ③
最大横向误差/m maximum lateral error	0.07	3.00	0.48	0.08
横向误差均方根误差 lateral error root mean square error	0.026 6	1.285 0	0.178 0	0.028 1
改善效果/% improve the effect	\	97	15	5
最大航向角误差/deg maximum course angle error	1.2	18.0	9.8	1.8
航向角误差均方根误差 course angle error root mean square error	0.004 8	0.113 0	0.014 1	0.006 7
改善效果/% improve the effect	\	95	34	28

表 5 随意载荷下“C”形轨迹测试结果

Tab. 5 Test result of "C" shape trajectory under random load

重量区间/kg weight interval	最大横向误差/m maximum lateral error	相差指数/% difference index	最大航向角误差/deg maximum course angle error	相差指数/% difference index
1~100	0.075	7.1	1.37	8.6
101~200	0.068	2.8	1.41	6.0
201~300	0.077	10.0	1.46	2.6
301~400	0.074	6.0	1.51	0.6
401~500	0.074	6.0	1.42	5.3
501~600	0.072	2.8	1.57	4.6
601~700	0.075	7.1	1.37	8.6
701~800	0.069	1.5	1.46	2.6
801~900	0.072	2.8	1.52	1.3
901~999	0.070	0.1	1.40	6.7

表 6 随意载荷下“S”形轨迹测试结果

Tab. 6 Test result of "S" shape trajectory under random load

重量区间/kg weight interval	最大横向误差/m maximum lateral error	相差指数/% difference index	最大航向角误差/deg maximum course angle error	相差指数/% difference index
1~100	0.071	1.4	1.20	0.1
101~200	0.075	7.1	1.15	4.1
201~300	0.067	4.2	1.17	2.5
301~400	0.071	1.4	1.28	7.0
401~500	0.072	2.8	1.30	8.5
501~600	0.066	5.7	1.30	8.5
601~700	0.072	2.8	1.14	5.0
701~800	0.075	7.1	1.17	2.5
801~900	0.071	1.4	1.30	8.5
901~999	0.076	8.5	1.15	4.2

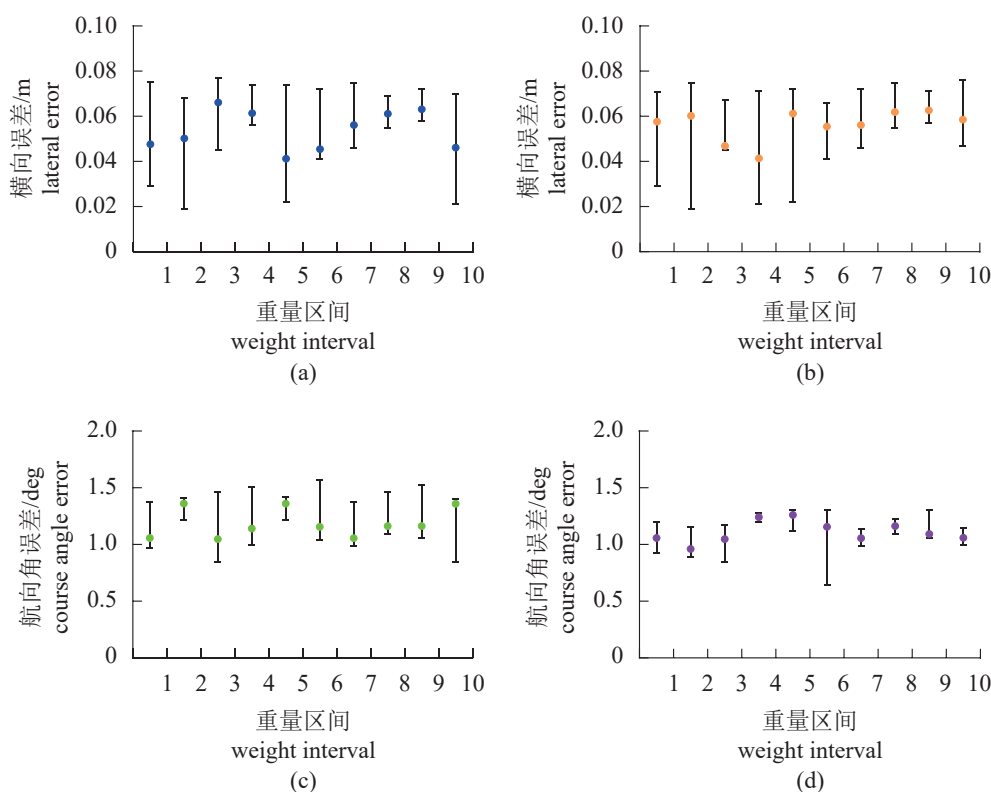


图 11 精度度散点图

Fig. 11 Scatter plot of accuracy

1. 100 kg, 2. 200 kg, 3. 300 kg, 4. 400 kg, 5. 500 kg, 6. 600 kg, 7. 700 kg, 8. 800 kg, 9. 900 kg, 10. 1 000 kg.

#### 4 结论

本实验提出的考虑延迟特性的路径跟踪控制方法在横向误差和航向角误差方面均显著优于不考虑延迟的 NMPC 和仅考虑执行器延迟的 NMPC 控制器, 横向误差和航向角误差分别降低 96% 和 95% 以上、15% 和 34% 以上。在通信延迟和执行器延迟共同作用下, 有效降低了误差, 表明了路径跟踪中考虑延迟的重要性; 相比 LQR 控制器,

本实验方法在航向角控制方面表现出较大的优势, 横向误差和航向角误差降低 5% 和 28% 以上。进一步说明了模型预测控制 (MPC) 对复杂延迟问题的处理能力较强。尽管本实验方法在精度上表现优异, 但在实际应用中, 非线性模型预测控制器由于计算复杂度较高, 在实时性方面仍有改进空间。未来的研究可以考虑通过优化算法结构或采用更高效的数值方法, 提升计算效率, 以确保该控制方法在智能化养殖车间中的广泛应用。研究

表明, 本实验方法有效应对了水产养殖运输无人车存在的延迟问题, 路径跟踪精度得到提升, 保证了养殖车间内无人车运输的准确性和安全性。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

### 参考文献 (References):

- [1] 刘世晶, 李国栋, 刘晃, 等. 中国水产养殖装备发展现状 [J]. 水产学报, 2023, 47(11): 119615.  
Liu S J, Li G D, Liu H, *et al.* Current development status of aquaculture equipment in China[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2023, 47(11): 119615 (in Chinese).
- [2] 王静香, 赵跃龙, 张忠明, 等. 水产养殖在保障粮食安全中的重要作用及前景 [J]. 农业展望, 2022, 18(2): 31-37.  
Wang J X, Zhao Y L, Zhang Z M, *et al.* The important role and prospect of aquaculture in ensuring food security[J]. *Agricultural Prospects*, 2022, 18(2): 31-37.
- [3] 朱明, 谭鹤群, 牛智有, 等. 我国淡水渔业转型升级路径与工程科技创新重点研究 [J]. 华中农业大学学报, 2024, 43(2): 1-9.  
Zhu M, Tan H Q, Niu Z Y, *et al.* Research on transformation and upgrading path of freshwater fisheries and key directions of engineering science and technology innovation in China[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2024, 43(2): 1-9 (in Chinese).
- [4] 刘曙光, 秦泉, 李华, 等. 水貂养殖轨道式双排自动饲喂车设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 108-117.  
Liu S G, Qin Q, Li H, *et al.* Design and test of rail-mounted double-row automatic feeding trolley for mink farming[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(9): 108-117 (in Chinese).
- [5] 陈溢强, 吴振陆, 李泳阳, 等. 循环水养殖车间巡检机器人系统研究与设计 [J]. 现代信息科技, 2022, 6(10): 116-120.  
Chen Y Q, Wu Z L, Li Y Y, *et al.* Research and design of patrol inspection robot system for circulating water aquaculture workshop[J]. *Modern Information Technology*, 2022, 6(10): 116-120 (in Chinese).
- [6] 肖红俊, 刘凯, 李莉莉, 等. 多层水槽式工厂化循环水养殖系统智能投饲车设计 [J]. 渔业现代化, 2019, 46(1): 21-26.  
Xiao H J, Liu K, Li L L, *et al.* Design of intelligent feeding car for multi-layer sink-type industrialized recirculating aquaculture system[J]. *Fishery Modernization*, 2019, 46(1): 21-26 (in Chinese).
- [7] 夏英凯, 朱明, 曾鑫, 等. 水产养殖水下机器人研究进展 [J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(3): 85-97.  
Xia Y K, Zhu M, Zeng X, *et al.* Progress of underwater robots for aquaculture[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2021, 40(3): 85-97 (in Chinese).
- [8] Jo K, Kim J, Kim D, *et al.* Development of autonomous car—part II: a case study on the implementation of an autonomous driving system based on distributed architecture[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(8): 5119-5132.
- [9] Berntorp K, Hoang T, Quirynen R, *et al.* Control architecture design for autonomous vehicles[C]//IEEE. 2018 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA). Copenhagen: IEEE, 2018: 404-411.
- [10] Wang Z W, Jin S F, Liu L H, *et al.* Design of intelligent connected cruise control with vehicle-to-vehicle communication delays[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(8): 9011-9025.
- [11] 吕颖, 祁旭, 刘秋铮, 等. 考虑转向延迟特性的自动驾驶车辆路径跟踪控制方法 [J]. 汽车工程, 2023, 45(12): 2234-2241.  
Lü Y, Qi X, Liu Q Z, *et al.* Path tracking control method with steering lag for autonomous vehicles[J]. *Automotive Engineering*, 2023, 45(12): 2234-2241 (in Chinese).
- [12] Lei Z Y, Ma X L, Yuan X W, *et al.* Research on automatic driving path tracking control of open-pit mine transportation vehicles with delay compensation[J]. *World Electric Vehicle Journal*, 2022, 13(8): 134.
- [13] 张亮修, 张铁柱, 吴光强. 考虑误差校正的智能车辆路径跟踪鲁棒预测控制 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(3): 20-27.  
Zhang L X, Zhang T Z, Wu G Q. Robust predictive control for intelligent vehicle path tracking considering error feedback correction[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2020, 54(3): 20-27 (in Chinese).
- [14] 李柏鹤, 蒋祖华, 陶宁蓉, 等. 考虑平板车合作运输的船舶分段堆场间调度 [J]. 上海交通大学学报, 2020, 54(7): 718-727.  
Li B H, Jiang Z H, Tao N R, *et al.* Ship block transportation scheduling considering cooperative transportation of flatcars[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2020, 54(7): 718-727 (in Chinese).
- [15] 申维一. 无人运输车路径规划和跟踪控制的研究与实现 [D]. 大连: 大连理工大学, 2022.  
Shen W Y. Research and implementation of path planning and tracking control for unmanned vehicles[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022 (in Chinese).

## Path tracking control for aquaculture workshop transport unmanned vehicles considering delay characteristics

CAO Shouqi<sup>\*</sup>, SUI Guoqing, ZHOU Guofeng

(College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** A high-precision path tracking control method considering delay characteristics was proposed to improve the path tracking accuracy of aquaculture transport unmanned vehicle in the process of transporting aquatic products. Firstly, the dynamics of the unmanned vehicle in the breeding workshop was analyzed. The dynamics model of the unmanned vehicle was built. Secondly, the communication delay and actuator delay were expressed as pure delay module and first order inertia delay model. The delay dynamic model was constructed. Through the model predictive control algorithm, the controller suitable for the intelligent breeding workshop scene was designed. The simulation platform was built by MATLAB/Simulink and CarSim, and verified based on the real transport unmanned vehicle and workshop layout. The results showed that compared with MPC controller without delay, MPC controller only considering actuator delay and LQR controller considering delay, the lateral error and course Angle error of the proposed method were reduced by 96% and 95%, 15% and 34%, 5% and 28%, respectively. The results showed that the proposed method performed better in path tracking when facing the delay problem. This study solves the delay problem of unmanned vehicles in aquaculture transportation, improves the path tracking accuracy, and ensures the accuracy and safety of unmanned vehicle transportation in aquaculture workshops.

**Key words:** driverless car; aquaculture transportation; intelligent farming; steering delay; model predictive control

**Corresponding author:** CAO Shouqi. E-mail: [sqcao@shou.edu.cn](mailto:sqcao@shou.edu.cn)

**Funding projects:** Shanghai Agricultural Science and Technology Innovation Project (I2023006); Shanghai Chongming District Agricultural Science and Technology Innovation Project (2021CNKC-05-06)