doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.02.004

基于双观测值融合卡尔曼滤波器的水田农机转向轮角估计方法与试验

满忠贤[1,2]　何　杰[1,2]　冯达文[1,2]　李仁浩[1,2]　邓小兵[1,2]　涂团鹏[1,2]
汪　沛[1,2]　胡　炼[1,2]

(1. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642;
2. 农业装备技术全国重点实验室, 广州 510642)

摘要: 针对水田自动驾驶农机遇到侧滑时速度突变导致转角估计不准确的问题,本文提出了一种基于双观测值融合卡尔曼滤波器的水田作业农机转向轮角估计方法,建立了水田作业农机转向轮角估计模型。首先采用改进型两轮农机侧滑模型获得基于运动学模型的水田农机前轮转向角度,其次对所采集的 GPS 速度和惯性导航速度采用加权观测融合的方法对转向模型的水田农机作业速度进行补偿,最后提出了基于双观测值融合卡尔曼滤波器的水田作业农机轮向轮角估计方法,将基于运动学模型的前轮转向角和基于转向电机编码的前轮转向角作为双观测值,从而估计水田农机前轮转角。为验证本文所提方法,以水稻直播机为研究平台,在水田中开展速度校正、前轮转向角估计试验和直线跟踪试验。速度校正试验结果表明,水田硬底层高低不平是前轮转角拟合精度不佳的直接原因,本文所提方法将直播机速度稳定在一定范围内,解决了因水田硬底层起伏变化造成前轮转角拟合精度不佳的问题。前轮转向角估计试验结果表明,农机前轮估计角度相对角度传感器角度变化跟踪误差平均值为 0.12°,偏差最大值为 1.67°,偏差标准差为 0.4°。本文所提方法能够准确地测量农机前轮转向角,最终控制直播机稳定追踪目标角度,满足水田农机前轮转角估计精度要求。直线跟踪试验结果表明,在水田环境下,平均绝对误差为 3.14 cm,位置偏差标准差为 2.11 cm。本文提出的方法适用于水田无人驾驶,提高了转角估计精度和农机导航作业质量。

关键词: 水田; 农业机械; 自动驾驶; 卡尔曼滤波器

中图分类号: S220; S24　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)02-0038-10　　**OSID**:

Estimation Method and Experiment of Wheel Angle of Paddy Field Agricultural Machinery Based on Dual Observation Fusion Kalman Filter

MAN Zhongxian[1,2]　HE Jie[1,2]　FENG Dawen[1,2]　LI Renhao[1,2]　DENG Xiaobing[1,2]
TU Tuanpeng[1,2]　WANG Pei[1,2]　HU Lian[1,2]

(1. *Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment*, *Ministry of Education*, *South China Agricultural University*, *Guangzhou* 510642, *China*
2. *State Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology*, *Guangzhou* 510642, *China*)

Abstract: In order to solve the problem that the sudden change of the speed of automatic driving agricultural machinery in paddy field leads to inaccurate angle estimation, a steering wheel angle estimation method of agricultural machinery in paddy field was proposed based on dual observation fusion Kalman filter, and a steering wheel angle estimation model of agricultural machinery in paddy field was established. Firstly, the improved two-wheeled agricultural machinery sideslip model was used to obtain the front wheel steering angle of paddy agricultural machinery based on kinematics model. Secondly, the collected GPS speed and inertial navigation speed were compensated by weighted observation fusion method. Finally, a method for estimating the front wheel steering angle of paddy agricultural machinery based on dual observation fusion Kalman filter was proposed, which took the front wheel steering angle based on kinematics model and the front wheel steering angle based on steering motor coding as dual

收稿日期: 2024-11-23　修回日期: 2024-12-24
基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000600)
作者简介: 满忠贤(1998—),男,博士生,主要从事智能农机自主作业技术研究,E-mail: manzx@scau.edu.cn
通信作者: 胡炼(1984—),男,研究员,博士,主要从事智能农机装备和无人农场研究,E-mail: lianhu@scau.edu.cn

observation values, so as to estimate the front wheel steering angle of paddy agricultural machinery. In order to verify the proposed method, speed correction, front wheel steering angle estimation test and linear tracking test were carried out in paddy field on the platform of rice direct seeding machine. The results of speed correction test showed that the unevenness of paddy field hard bottom layer was the direct reason for the poor fitting accuracy of front wheel angle. The proposed method stabilized the speed of direct seeding machine in a certain range, and solved the problem of poor fitting accuracy of front wheel angle caused by the fluctuation of paddy field hard bottom layer. The front wheel steering angle estimation experiment showed that the average tracking error of the virtual wheel angle relative to the angle change of the angle sensor was 0.12°, the maximum deviation was 1.67° and the standard deviation was 0.4°. The method can accurately measure the steering angle of the front wheel of agricultural machinery, and finally control the direct seeding machine to track the target angle stably, which met the accuracy requirements of estimation of front wheel angle of agricultural machinery in paddy field. The results of linear tracking test showed that the average error was 3.14 cm and the standard deviation of position deviation was 2.11 cm in paddy field environment. The method proposed was suitable for unmanned paddy field, which improved the accuracy of corner estimation and the quality of agricultural machinery navigation.

Key words: paddy field; agricultural machinery; autopilot; Kalman filter

0　引言

现代农业发展不断加快[1-2]，先进的智能农机装备需求逐年增加，施行创新驱动发展战略，加快推进农机智能化与现代化技术的发展，是实现农业现代化、保障粮食安全迫切的要求。

农业机械的自动驾驶是农机智能化的重要功能之一，自动驾驶作业代替人工驾驶作业有效减少了重复作业并提高资源利用率[3]，使驾驶员从繁重的体力劳动中解脱出来，具有巨大的应用前景[4-7]。近几年采用大扭矩伺服电机转向控制系统替代了传统的液压转向系统[8-9]，转向轮角作为转向控制技术的反馈信号输入，是决定转向控制精度的重要因素之一[10-11]。

农机转向轮角测量技术主要分为 3 类：①采用位移式传感器测量油缸行程获取转向轮角[12-13]。②在转向轮的转向轴安装角度传感器测量前轮转向角度[14-16]。③在转向轴安装陀螺仪等惯性传感器检测车轮相对车体的角度[17-18]。

在前轮转向轴安装角度传感器[19-20]虽然所采集到的车辆转角精度较高，但传感器安装件多，存在安装复杂，角度标定难度大，长时间使用容易出故障等问题[21-22]。国内外学者多采用陀螺仪作为轮角采集器件，传感器安装简单，可有效解决农机前轮转角测量精度和安装困难的问题[23-24]。

目前间接采集前轮转向角的方法主要利用 GNSS 双天线的航向信息和速度信息以及陀螺仪的前轮转向角速率进行融合，计算出农机的前轮转角，具有较好的测量精度[25-26]。但由于 GNSS 输出频率较低，陀螺仪的输出信息误差随着时间累计[27-28]，在使用一段时间后，前轮转向角度测量精度下降。利用双天线姿态代替陀螺仪姿态，并未解决双天线输出频率较低的问题，以方向盘转向角度作为前轮转角的观测量，没有考虑转向系统存在间隙和死区，有较大误差。同时水田机械容易受到硬底层凹凸不平的影响[29-30]，尤其是水田作业农机侧滑时速度突变以及陀螺仪数据漂移等问题，造成农机转向角测量精度下降[31]。为此本文以水稻直播机为研究平台，针对水田农机遇到侧滑时速度突变导致转角估计不准确的问题，提出一种基于双观测值融合卡尔曼滤波器的水田作业农机轮向轮角估计方法，建立水田作业农机转向轮角估计模型。首先采用改进型两轮农机侧滑模型获得水田农机基于运动学模型的前轮转向角度，其次对所采集的 GPS 速度和惯性导航速度采用加权观测融合的方法对转向模型的水田农机作业速度进行补偿，最后提出基于双观测值融合卡尔曼滤波器的水田作业农机转向轮角估计方法，将基于运动学模型的前轮转向角度和基于转向电机编码的前轮转向角度作为双观测值，以保证在水田农机遇到侧滑造成速度突变的情况下，能够对前轮转角进行准确估计。

1　水田作业农机转向轮角估计模型

1.1　农机前轮转角估计算法

1.1.1　基于双观测值融合卡尔曼滤波器的水田农机前轮转角估计算法

分析农机转向机构转向特性，构建电机转向角度和前轮转向角度之间数学传递模型，获得基于转向电机编码的前轮转向角度估计值；采用改进型两轮农机侧滑模型获得基于运动学模型的前轮转向角度估计值，对水田硬底层不平发生侧滑从而导致速

度误差进行补偿,从而保证在侧滑情况下能够对基于运动学模型的前轮转角进行准确估计。结合 2 种方法的优点,本文基于双观测值融合卡尔曼滤波器的水田作业农机转向轮角估计方法获取前轮转向角度。融合后系统的观测方程为

$$\boldsymbol{Z}_f(k)=\boldsymbol{H}_f(k)+\boldsymbol{V}_f(k) \tag{1}$$

其中

$$\begin{cases}\boldsymbol{Z}_f(k)=[\boldsymbol{Z}_1^{\mathrm{T}}(k)\quad \boldsymbol{Z}_2^{\mathrm{T}}(k)]\\ \boldsymbol{H}_f(k)=[\boldsymbol{H}_1^{\mathrm{T}}(k)\quad \boldsymbol{H}_2^{\mathrm{T}}(k)]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{V}_f(k)=[\boldsymbol{V}_1^{\mathrm{T}}(k)\quad \boldsymbol{V}_2^{\mathrm{T}}(k)]^{\mathrm{T}}\end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{cases}\boldsymbol{Z}_1=[\delta_f]\\ \boldsymbol{Z}_2=[\delta_y]\end{cases} \tag{3}$$

式中 $\boldsymbol{Z}_f(k)$——融合后观测矩阵

$\boldsymbol{Z}_1^{\mathrm{T}}(k)$、$\boldsymbol{Z}_2^{\mathrm{T}}(k)$——系统 1、2 观测量

$\boldsymbol{H}_f(k)$——融合后测量矩阵

$\boldsymbol{H}_1^{\mathrm{T}}(k)$、$\boldsymbol{H}_2^{\mathrm{T}}(k)$——系统 1、2 测量矩阵

$\boldsymbol{V}_f(k)$——融合后观测噪声

$\boldsymbol{V}_1^{\mathrm{T}}(k)$、$\boldsymbol{V}_2^{\mathrm{T}}(k)$——系统 1、2 观测噪声

系统 1 为基于电机编码的前轮转角 δ_f,系统 2 为基于运动学模型的前轮转角 δ_y。

对状态进行进一步预测

$$\hat{\boldsymbol{x}}(k+1)=\boldsymbol{\phi}\hat{\boldsymbol{x}}(k)+\boldsymbol{K}_f\boldsymbol{Z}_f(k) \tag{4}$$

其中

$$\boldsymbol{\phi}=(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{K}_f)\boldsymbol{A}_f$$

$$\boldsymbol{K}_f=\boldsymbol{\zeta}_f(\boldsymbol{H}_f\boldsymbol{\zeta}_f+\boldsymbol{R}_f)^{-1} \tag{5}$$

式中 $\hat{\boldsymbol{x}}(k+1)$——$k$ 时刻系统状态后验估计

$\hat{\boldsymbol{x}}(k)$——k 时刻系统状态的先验估计

$\boldsymbol{\phi}$——转移矩阵

$\boldsymbol{K}_f$——滤波增益矩阵

$\boldsymbol{I}$——单位矩阵

$\boldsymbol{A}_f$——状态转移矩阵

$\boldsymbol{\zeta}_f$——预测的状态先验协方差矩阵

$\boldsymbol{R}_f$——对状态观测的协方差矩阵

$\boldsymbol{P}_f(k)$为协方差矩阵

$$\boldsymbol{P}_f(k)=\boldsymbol{\phi}\boldsymbol{P}_f^{-}(k)\boldsymbol{\phi}^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{\Gamma}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{\Gamma}^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{\xi}(k) \tag{6}$$

式中 $\boldsymbol{\Gamma}$——常数矩阵

$\boldsymbol{Q}$——过程噪声协方差矩阵

$\boldsymbol{\xi}(k)$——测量噪声协方差矩阵

对式(6)两边取射影有

$$\hat{\boldsymbol{Z}}_f(k)=\boldsymbol{H}_f\hat{\boldsymbol{x}}(k)+\mathrm{proj}(\boldsymbol{V}_f(k)) \tag{7}$$

式中 $\mathrm{proj}(\boldsymbol{V}_f(k))$——$\hat{\boldsymbol{x}}(k)$在 $\boldsymbol{V}_f(k)$上的射影

引出新息的表达式

$$\boldsymbol{\varepsilon}_f(k+1)=\hat{\boldsymbol{Z}}_f(k+1)-\hat{\boldsymbol{Z}}_f(k) \tag{8}$$

结合式(4)、(6)和式(8)得

$$\boldsymbol{\varepsilon}_f(k+1)=\boldsymbol{H}_f\hat{\boldsymbol{x}}(k)+\boldsymbol{V}_f(k) \tag{9}$$

得到新息方差阵为

$$E[\boldsymbol{\varepsilon}_f(k+1)\boldsymbol{\varepsilon}_f^{\mathrm{T}}(k+1)]=\boldsymbol{H}_f\boldsymbol{P}_f(k)\boldsymbol{H}_f^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{R}_f \tag{10}$$

进而得到协方差矩阵

$$\begin{aligned}\boldsymbol{P}_f(k+1)=&E[\boldsymbol{\varepsilon}_f(k+1)\boldsymbol{\varepsilon}_f^{\mathrm{T}}(k+1)]=\\&(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{K}_f(k)\boldsymbol{H}_f)\boldsymbol{P}_f(k)(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{K}_f(k)\boldsymbol{H}_f)^{\mathrm{T}}+\\&\boldsymbol{K}_f(k+1)\boldsymbol{R}_f\boldsymbol{K}_f^{\mathrm{T}}(k+1)\end{aligned} \tag{11}$$

得到状态更新方程

$$\hat{\boldsymbol{x}}(k+1)=\hat{\boldsymbol{x}}(k)+\boldsymbol{K}_f(k+1)\boldsymbol{\varepsilon}_f(k+1) \tag{12}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_f(k+1)=\boldsymbol{Z}_f(k+1)-\boldsymbol{H}_f\hat{\boldsymbol{x}}(k) \tag{13}$$

更新后协方差矩阵为

$$\boldsymbol{P}_f(k+1)=(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{K}_f(k+1)\boldsymbol{H}_f)\boldsymbol{P}_f(k) \tag{14}$$

即可利用基于双观测值融合卡尔曼滤波器得到农机前轮转角的估计值,水田作业农机转向轮角估计方法如图 1 所示。图 1 中 δ 为农机前轮转角估计值,rad;δ_i 为控制器输出的控制角度,rad;$G(s)$为转向系统传递函数;$\dot{\psi}_h$ 为基于 IMU 的航向变化率,rad/s;$\dot{\psi}_l$ 为基于 GPS 的航向变化率,rad/s;$\dot{\psi}$ 为融合后航向变化率,rad/s;v_g 为采用杆臂补偿后 GPS 速度,m/s;v_b 为惯性导航速度,m/s;v 为融合之后的农机速度,m/s;L 为农机前轮和后轮距离,m;ρ 为侧滑角,(°)。

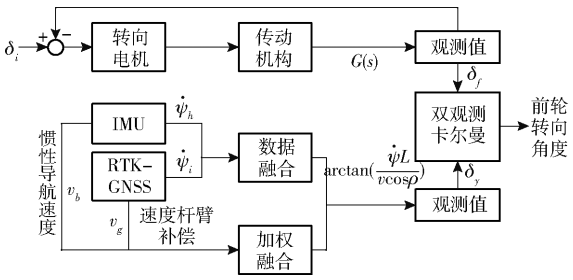


图 1 水田作业农机轮向轮角估计方法

Fig. 1 Estimation method of wheel angle of agricultural machinery in paddy field

1.1.2 基于转向电机编码的农机转向角估计

利用电动方向盘代替原有的手动方向盘,方向盘安装于转向柱上面,方向盘转动带动转向轴运动,进而带动整个转向系统。农机转向系统均采用液压助力转向系统,刚性大、响应速度慢、结构复杂,还存在转向结构之间的间隙,对控制精度影响较大。转向系统模型如图 2 所示。

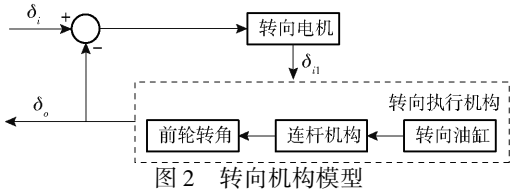


图 2 转向机构模型

Fig. 2 Steering mechanism model

图 2 中,δ_{i1}为经过转向电机的转向柱角度,δ_o 为经过转向执行机构前轮转过角度,转向执行机构由转向油缸、连杆机构和前轮转角组成。在不考虑系统间隙情况下,方向盘转角和输入的控制角度成积分关系,其系统传递函数为

$$\frac{\delta_{i1}(s)}{\delta_i(s)}=\frac{K_1}{s} \tag{15}$$

若考虑惯性系统，转向系统传递函数表示为

$$\frac{\delta_o}{\delta_{i1}}=\frac{K_2}{\tau s+1} \tag{16}$$

式中　τ——时间常数，可通过系统辨识试验得出

根据式(15)、(16)可得转向系统传递函数为

$$G(s)=\frac{\delta_o(s)}{\delta_i(s)}=\frac{K}{s(\tau s+1)} \tag{17}$$

其中　　$K=K_1K_2$

式中　K_1、K_2、K——常数

根据转向系统的传递函数即可得到基于转向电机编码的农机转向角度 δ_f 为

$$\delta_f=\delta_i G(s) \tag{18}$$

1.1.3　基于运动学模型的转向角度估计

水田农机常采用二自由度车辆动力学模型，农机在运行过程中其运行状态复杂多变，因此在建模的过程中忽略转向系统中的间隙，只考虑车轮做纯滚动，同时忽略农机具对车身的影响，从而达到简化模型的目的。然而，如图 3 所示，由于水田农机具具有水平方向自动调平功能，且水田作业时，机具悬浮于泥面，窄车轮深陷泥底，机具的姿态变化受到浮泥的约束，而窄车轮受硬底层上下起伏姿态变化明显。水田农机 GNSS 定位天线安装于前方支架，假设硬底面不平，有坡度为 ρ 的斜坡，引起水田农机机头横滚角变化，因此水田作业时机具相对于机头有较明显相对的横滚位姿变化，从而导致机具产生横向位置定位偏差[31]。为此本文采用改进型两轮农机侧滑模型引入农机侧滑角 ρ 来表示农机相对硬底面的角度变化。



图 3　水田农机倾斜示意图

Fig. 3　Schematic of agricultural machinery inclination in paddy field

如图 4 所示，农机具有以下状态量 $\{x_c, y_c, \psi, v, \delta, \dot{\psi}_h\}$，分别对应农机在车体坐标系下的位置坐标 x_c 和 y_c、农机航向角 ψ、行驶速度 v、前轮转向角度 δ 和农机航向变化率 $\dot{\psi}$。A 为农机等效前轮位置；B 为农机等效后轮位置；C 是农机控制点；O 为农机旋转中心；δ_a 为农机前轮转角，rad；δ_b 为农机后轮转角，rad；L_a 为农机前轮到控制点的距离，m；L_b 为农机后轮到控制点距离，m；R 为车辆转弯半径，m。

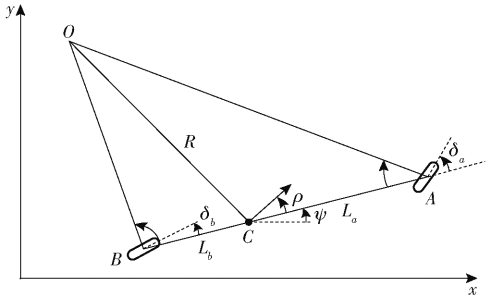


图 4　改进型两轮农机侧滑模型

Fig. 4　Improved sideslip model of two-wheeled agricultural machinery

根据图 4 中几何关系可得

$$\begin{cases}\dfrac{\sin(\delta_a-\rho)}{L_a}=\dfrac{\sin\left(\dfrac{\pi}{2}-\delta_a\right)}{R}\\[2ex]\dfrac{\sin(\rho-\delta_b)}{L_b}=\dfrac{\sin\left(\dfrac{\pi}{2}+\delta_b\right)}{R}\end{cases} \tag{19}$$

根据三角函数定理可得

$$\begin{cases}\dfrac{\sin\delta_a\cos\rho-\sin\rho\cos\delta_a}{L_a}=\dfrac{\cos\delta_a}{R}\\[2ex]\dfrac{\cos\delta_b\sin\rho-\cos\rho\sin\delta_b}{L_b}=\dfrac{\cos\delta_b}{R}\end{cases} \tag{20}$$

进一步化简可得

$$\begin{cases}\tan\delta_a\cos\rho-\sin\rho=\dfrac{L_a}{R}\\[2ex]\sin\rho-\tan\delta_b\cos\rho=\dfrac{L_b}{R}\end{cases} \tag{21}$$

两式相加可得转角和转弯半径的关系

$$(\tan\delta_a-\tan\delta_b)\cos\rho=\frac{L}{R} \tag{22}$$

得到农机单车运动学模型

$$\begin{cases}\dot{x}_c=v\cos(\psi+\rho)\\\dot{y}_c=v\sin(\psi+\rho)\\\dot{\psi}=\dfrac{v\cos\rho(\tan\delta_a-\tan\delta_b)}{L}\end{cases} \tag{23}$$

大多数情况下农机的后轮是不可以转动的，车辆转向系统往往作用于前轮，车辆前轮的转向角度就是车辆的转向角度，进而推出基于运动学模型的转向角度 δ_y，计算式为

$$\delta_y=\arctan\frac{\dot{\psi}L}{v\cos\rho} \tag{24}$$

1.2　运动学模型补偿算法

当农机发生侧滑或打滑时，农机侧滑角度 ρ 可分解为产生与前进速度相垂直的侧向角速度干扰 v_μ

和相反的顺向速度干扰 v_ε,从而使农机偏离原行驶方向[32],前轮转角估计精度降低。

农机受到侧滑干扰时约束方程为

$$\begin{cases}\dot{x}_c\sin\delta_y-\dot{y}_c\cos\delta_y-L_b\dot{\delta}_y=v_\mu\\ \dot{x}_c\sin\delta_y+\dot{y}_c\cos\delta_y+L\dot{\delta}_y=R(\dot{\delta}_a-v_\varepsilon)\\ \dot{x}_c\sin\delta_y+\dot{y}_c\cos\delta_y-L\dot{\delta}_y=R(\dot{\delta}_b-v_\varepsilon)\end{cases}\tag{25}$$

考虑到侧滑和纵向打滑干扰的拉格朗日动力学模型表示为

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}}+\boldsymbol{v}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}}+\boldsymbol{G}_v(\boldsymbol{q})+v_\lambda\boldsymbol{I}_v=\boldsymbol{T}_v(\boldsymbol{q})\xi_\tau\tag{26}$$

其中 $\boldsymbol{q}=[x_c\quad y_c\quad \delta_y]^{\mathrm{T}}$

式中 $\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})$——惯性矩阵 $\boldsymbol{q}$——位置矩阵

$\boldsymbol{v}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})$——科氏矩阵 $\boldsymbol{G}_v(\boldsymbol{q})$——重力矩阵

$\boldsymbol{I}_v$——单位矩阵 v_λ——拉格朗日算子

$\boldsymbol{T}_v(\boldsymbol{q})$——变换矩阵 ξ_τ——力矩项

水田作业时由于硬底层不平导致侧滑和打滑现象时有发生[33],当侧滑角 ρ 增大时,车辆行驶速度变化过大,同时由横摆力导致航向变化率增大,从而影响到基于运动学模型转向角。根据农机运动学和动力学模型可知侧向角速度干扰和车速、侧滑角、车身质心至侧滑中心距离以及轴距有关,并与车速平方成正比[34]。因此,本文对水田硬底层不平发生侧滑从而导致速度误差进行补偿,从而保证在侧滑情况下能够对基于运动学模型前轮转角进行准确的估计。

1.2.1 速度杆臂补偿

准确的描述速度、角速度和加速度往往涉及到多个坐标系,为使坐标系统一,本文车体坐标系(b 系)以车体几何中心为坐标原点,车头前进方向为 x 轴,根据右手法则确定 y 轴和 z 轴。一般而言,轮角测量系统在实际安装时 RTK-GNSS 天线和 IMU 与农机质心位置难以重合,转向轮角测量系统的各传感器都存在杆臂效应,从而引入了系统测量误差。本系统需要对由 RTK-GNSS 测得的农机车身速度 v_g 进行杆臂补偿。

图 5 为农机臂效应图,RTK-GNSS 天线与农机质心的杆臂长度矢量 $\boldsymbol{l}_{\mathrm{gnss}}$ 为

$$\boldsymbol{l}_{\mathrm{gnss}}=[l_x\quad l_y\quad l_z]^{\mathrm{T}}\tag{27}$$

采用杆臂补偿后速度 v_g 为

$$\begin{cases}\boldsymbol{v}_{gt}=[v_x\quad v_y\quad 0]^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{v}_{\mathrm{gnss}}-\boldsymbol{e}_v\\ \boldsymbol{\omega}_{tb}^b=[0\quad \dot{\gamma}_g\quad \dot{\varphi}_g]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{e}_v=\begin{bmatrix}e_{vx}\\ e_{vy}\\ e_{vz}\end{bmatrix}=\boldsymbol{T}_b^t(\boldsymbol{\omega}_{tb}^b\times\boldsymbol{l}_{\mathrm{gnss}})\\ v_g=\sqrt{v_x^2+v_y^2}\end{cases}\tag{28}$$

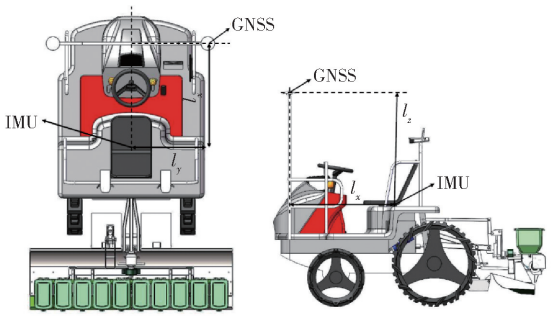


图 5 农机杆臂效应图

Fig. 5 Arm effect of agricultural machinery

式中 $\boldsymbol{v}_{gt}$——经杆臂补偿后的速度矢量

γ_g、φ_g——RTK-GNSS 横滚角和航向角,(°)

$\boldsymbol{e}_v$——杆臂效应产生的速度误差矩阵

$\boldsymbol{v}_{\mathrm{gnss}}$——RTK-GNSS 水平速度,m/s

$\boldsymbol{\omega}_{tb}^b$——农机转动角速率矢量矩阵

$\boldsymbol{T}_b^t$——农机转动坐标转换矩阵

v_x、v_y——农机正东和正北方向速度,m/s

e_{vx}、e_{vy}、e_{vz}——杆臂效应产生 x、y、z 方向速度误差,m/s

1.2.2 惯性导航速度

基于地心惯性坐标系(i 系)、当地导航系统(n 系)和地球坐标系(e 系)获得从地面观察农机位置随时间的变化,得出农机速度微分方程为

$$\begin{cases}\boldsymbol{v}_{eb}=\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}_{eb}}{\mathrm{d}t}\\ \dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}_{eb}}{\mathrm{d}t}=\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}_b}{\mathrm{d}t}+\boldsymbol{\omega}_{eb}\times\boldsymbol{r}_i\\ \boldsymbol{a}_i=\dfrac{\mathrm{d}^2\boldsymbol{r}_i}{\mathrm{d}t^2}=\boldsymbol{f}_i+\boldsymbol{g}_e\end{cases}\tag{29}$$

式中 $\boldsymbol{v}_{eb}$——b 系相对于 e 系的速度向量,m/s

$\boldsymbol{r}_{eb}$——从 e 系原点指向 b 系原点的位置向量,m

$\boldsymbol{r}_b$——b 系速度向量,m/s

$\boldsymbol{\omega}_{eb}$——b 系相对于 e 系的角速度向量,rad/s

$\boldsymbol{r}_i$——i 系下位置向量,m

$\boldsymbol{a}_i$——i 系下加速度向量,m/s²

$\boldsymbol{f}_i$——i 系下比力向量,m/s²

$\boldsymbol{g}_e$——重力加速度向量,m/s²

将速度转换为车体坐标系下速度微分方程为

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}_{bt}}{\mathrm{d}t}=\boldsymbol{f}_b-2\boldsymbol{\omega}_{ie}\times\boldsymbol{v}_{bt}+\boldsymbol{g}_b=\boldsymbol{C}_b^b\boldsymbol{f}_b-(2\boldsymbol{\omega}_{ie}+\boldsymbol{\omega}_{en})\times\boldsymbol{v}_{bt}+\boldsymbol{g}_b\tag{30}$$

式中 $\boldsymbol{v}_{bt}$——b 系下车体速度,m/s

$\boldsymbol{f}_b$——b 系下比力向量,m/s²

$\boldsymbol{\omega}_{en}$——e 系相对于 n 系的角速度向量,rad/s

$\boldsymbol{g}_b$——b 系下重力加速度向量,m/s²

$\boldsymbol{C}_b^b$——等效旋转矩阵

$\boldsymbol{\omega}_{ie}$——i 系相对 e 系的角速度向量，rad/s

对式(30)进行积分，得到基于车体坐标系(b 系)下的农机速度 v_b 为

$$\begin{cases} \boldsymbol{v}_{bt}(t) = \boldsymbol{v}_{bt}(t-1) + \boldsymbol{C}_b^b \boldsymbol{f}_b \Delta t + \\ \quad [\boldsymbol{g}_b - (2\boldsymbol{\omega}_{ie} + \boldsymbol{\omega}_{en}) \times \boldsymbol{v}_{bt}] \Delta t \\ v_b = \sqrt{v_{btx}^2 + v_{bty}^2} \end{cases} \tag{31}$$

式中　v_{btx}——b 系下车体速度在 x 轴速度分量，m/s

v_{bty}——b 系下车体速度在 y 轴速度分量，m/s

1.2.3　加权观测融合算法

本文结合鲁棒加权观测值融合卡尔曼滤波器[35]，设计一种混合卡尔曼融合算法，提高农机速度的估计精度。

考虑在确定模型下噪声线性离散方程为

$$\boldsymbol{x}(k+1) = \boldsymbol{A}_f \boldsymbol{x}(k) + \boldsymbol{\Gamma} \boldsymbol{W}(k) \tag{32}$$

$$\boldsymbol{Z}_i(k) = \boldsymbol{H}_i \boldsymbol{x}(k) + \boldsymbol{V}_i(k) \quad (i = 1, 2, \cdots, n) \tag{33}$$

式中　$\boldsymbol{x}(k)$——k 时刻状态

$\boldsymbol{Z}_i(k)$——第 i 个子系统观测值

$\boldsymbol{W}(k)$——系统噪声

$\boldsymbol{V}_i(k)$——第 i 个子系统的观测噪声

GNSS 速度在匀速行驶中精度高，但遇到侧滑时 GNSS 速度会发生突变导致稳定性较差；惯性导航系统速度在加减速时抗干扰能力强，不会发生较大的变化。为综合这两种测量方法的优点，本文采用 GNSS 速度和惯性导航系统速度加权融合的方法获取农机速度

$$\begin{cases} v_j = \sum_{i=1}^{n} (W_{1i} v_g + W_{2i} v_b) \\ \sum_{i=1}^{n} (W_{1i} + W_{2i}) = 1 \end{cases} \tag{34}$$

式中　W_{1i}、W_{2i}——GNSS 速度和惯性导航系统速度权值

状态更新方程为

$$\begin{cases} \boldsymbol{Z}_r(k) = \boldsymbol{x}(k) + \boldsymbol{V}_r(k) \\ \hat{\boldsymbol{x}}(k+1) = \hat{\boldsymbol{x}}(k) + \boldsymbol{K}_r(k+1) \boldsymbol{\varepsilon}_r(k+1) \\ \boldsymbol{\varepsilon}_r(k+1) = \boldsymbol{Z}_r(k+1) - \boldsymbol{H}_r \hat{\boldsymbol{x}}(k) \\ \boldsymbol{P}_r(k+1) = (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{K}_r(k+1) \boldsymbol{H}_r) \boldsymbol{P}_r(k) \end{cases} \tag{35}$$

式中　$\boldsymbol{K}_r(k+1)$——k 时刻系统状态后验估计后验协方差

$\boldsymbol{P}_r(k+1)$——k 时刻系统状态后验估计后验方差

即可利用基于加权观测的卡尔曼滤波器得到农机作业速度的预估值

$$\boldsymbol{v} = \hat{\boldsymbol{x}}(k+1) \tag{36}$$

2　试验材料与方法

2.1　试验材料

试验以洋马 YR60D 型直播机为研究平台，双天线接收机、BRT38 型角度传感器和 HWT605 姿态角度传感器作为测量传感器。洋马 YR60D 型直播机主要技术参数如表 1 所示。

表 1　直播机主要技术参数

Tab. 1　Main technical parameters of direct seeding machine

参数	数值
尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	3 320×2 200×2 330
整机质量/kg	815
作业速度/(m·s^{-1})	0～1.6
轴距/mm	1 100
前后轮距/mm	1 100

GPS 定位天线采用上海司南卫星导航技术有限公司生产的多频多模高精度定位天线 AT360 型，该天线支持北斗、GPS、GLONASS 和 GALILEO 主流导航系统卫星信号的接收；定位板卡采用北京和芯星通科技有限公司生产的 UB482 板卡，该板卡的输出频率为 20 Hz，差分定位精度为毫米级，集成于一体化导航控制器内；控制器采用深圳从平科技有限公司生产的 SPRING 10 型显控一体控制器，拥有 4 核 1.2 GHz 处理器；转向电机采用上海导航技术股份有限公司生产的 CES 大扭矩电动方向盘；IMU 模块采用深圳维特智能科技生产的 6 轴传感器 HWT605 型，输出频率为 50 Hz，安装于直播机座位下方(车体中心位置)；运动控制器采用长沙硕博电子科技有限公司生产的 SPC－STW－2612CM 型，具备 6 路比例阀 PVC 功能及 2 路 H 桥功能，实现直播机的自动驾驶底盘控制；角度传感器采用深圳布瑞特科技有限公司生产的 BRT38 型，角度传感器安装在农机的前轮转向轴位置，通过支撑板固定在机架上，旋转轴通过支架连接在前轮上，间接测量前轮旋转的角度。双天线安装于车辆左右最前方，离地高度为 2.4 m，基线长 1.6 m，距离控制点(车体中心)长度为 1.75 m，如图 6 所示。

2.2　试验方法

为验证基于双观测值融合卡尔曼滤波器的水田作业农机转向轮角估计方法在水田环境下的估计精度，在华南农业大学增城教学科研基地进行试验。田间试验采用基于模型预测控制(MPC)的水田农业机械路径跟踪控制算法[31]，天线到导航控制点的杆臂长度 $\boldsymbol{l} = [1.75\ \text{m} \quad 0.8\ \text{m} \quad 1.5\ \text{m}]^{\mathrm{T}}$，试验分 3 组进行：



图 6 导航系统安装图

Fig. 6 Navigation system installation diagram

1. GPS 定位天线 2. 控制器 3. 转向电机 4. IMU 模块 5. 运动控制器 6. 角度传感器

(1)速度校正试验:在水田硬底层不平坦情况下控制直播机自动导航,探究水田硬底层对直播机速度的影响,同时考察本文所提方法对速度校正效果。

试验开始时,选取一块硬底层不平的水田(泥脚深约 30 cm),设置自动驾驶速度为 0.7 m/s 进行自动驾驶试验,同时记录试验数据。根据水田硬底层轮廓构建方法[33]准确地获取试验田块硬底层等高线信息,构建底层等高线的数字模型。分析水田硬底层不平对直播机作业速度的影响,利用加权观测融合算法对比拟合后的速度和直播机采集到的 GPS 速度。

(2)前轮转向角度估计试验:在水田硬底层不平坦情况下控制直播机自动导航,探究水田硬底层对估计模型的影响,同时考察本文所提方法前轮转角拟合精度。

试验开始时,选取水田设置自动驾驶速度为 0.7 m/s 进行自动驾驶试验,同时记录试验数据。安装在农机的前轮转向轴位置的直连式角度传感器作为对照组,由于传感器存在安装误差不能对角度进行直接对比。同时角度的变化趋势相同,故采用角度变化的差值来考察本文所提算法的精度。

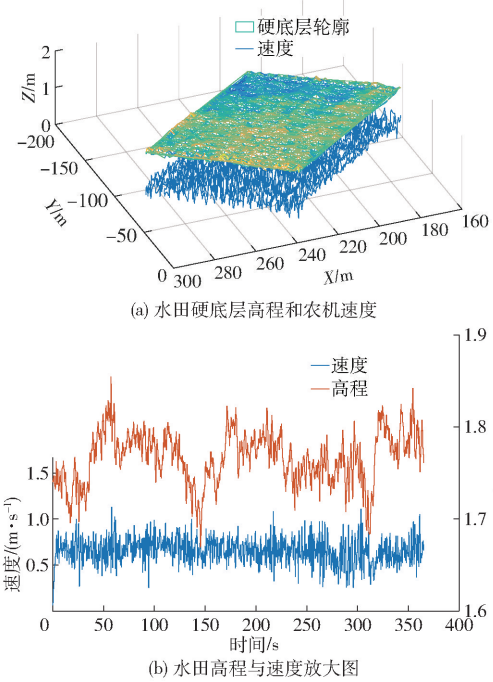
(3)直线跟踪试验:水稻直播机在水田中自动导航作业,考察其直线跟踪的控制精度。

控制水稻直播机以速度 1 m/s 进行直线跟踪试验。采用北斗定位装置记录车辆位置信息和航向信息,定位信息采样频率为 20 Hz,进行多次试验计算其相对偏差量。试验步骤:①获取地块的边界点信息,分别在地块的两端选取两点作为直线跟踪试验的起点和终点。②导航系统选择无人驾驶模式,使水稻直播机沿着导航基准线进行直线跟踪。③启动水稻直播机,开始进行直线跟踪试验。④根据车载北斗定位装置实时记录车辆定位数据。⑤重复进行多次试验,并将试验数据进行滑动均值滤波,消除异常点的干扰,分析直线跟踪特性。

3 试验结果与分析

3.1 速度校正试验

水田硬底层轮廓与农机作业速度如图 7 所示,采集水田硬底层三维坐标点,对点集进行 Delaunay 三角剖分,构建了试验田块的水田硬底层轮廓图。水田硬底层凹凸不平,高程变化是随机过程,直播机速度随地形起伏变化过大。图 8 为测量的原始速度和本文所提方法拟合校正后的速度,拟合后的直播机速度趋近于设定速度,不会发生较大变化,起伏不超过 0.05 m/s。表 2 为水田前 8 行直播机速度和高程数据,水田高程最大值、最小值和平均高程均值分别为 1.62、1.39、1.49 m;直播机最大、最小速度和平均速度均值分别为 1.07、0.26、0.64 m/s。水田硬底层轮廓高程与直播机速度具有统计相关性,高程变化直接影响速度。试验表明水田硬底层高低不平是前轮转角拟合精度不佳的直接原因,本文所提方法将直播机速度稳定在一定范围内,解决了因水田硬底层起伏变化造成前轮转角拟合精度不佳的问题。



(a) 水田硬底层高程和农机速度

(b) 水田高程与速度放大图

图 7 水田硬底层轮廓与农机作业速度

Fig. 7 Paddy field hard bottom contour and agricultural machinery operation speed

3.2 前轮转向角度估计试验

试验次数 1 结果如图 9 所示,农机前轮估计角度与角度传感器所测得的角度变化趋势基本保持一致,两角度之间存在一个由于安装误差导致的角度差。试验结果如表 3 所示,角度跟踪平均误差为 0.12°,偏差最大值为 1.67°,偏差标准差为 0.4°。

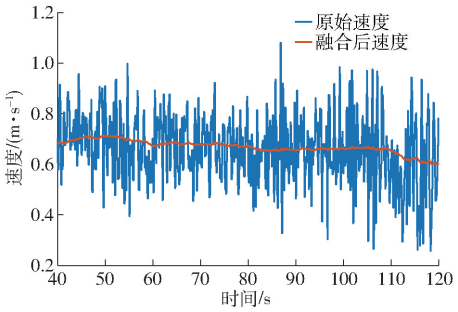


图 8　原始速度与拟合校正后速度

Fig. 8　Original velocity and velocity after fitting and correction

表 2　前 8 行直播机速度和高程数据

Tab. 2　Data of speed and elevation of direct seeding machine in the first eight rows

行序号	最大速度/(m·s⁻¹)	最小速度/(m·s⁻¹)	平均速度/(m·s⁻¹)	最大高程/m	最小高程/m	平均高程/m
1	1.13	0.26	0.64	1.63	1.41	1.52
2	1.06	0.23	0.51	1.68	1.38	1.52
3	0.97	0.21	0.56	1.61	1.36	1.49
4	1.09	0.32	0.71	1.56	1.40	1.46
5	1.17	0.24	0.67	1.58	1.43	1.49
6	1.27	0.31	0.69	1.67	1.39	1.51
7	0.93	0.29	0.73	1.65	1.37	1.48
8	0.98	0.24	0.63	1.63	1.38	1.49
均值	1.07	0.26	0.64	1.62	1.39	1.49

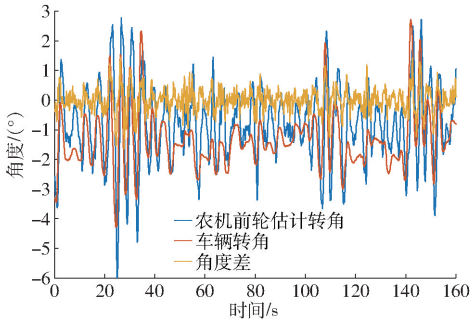


图 9　角度对比

Fig. 9　Angle contrast diagram

试验结果表明：在深泥脚阻力大时，基于双观测值融合卡尔曼滤波器的水田作业农机轮向轮角估计方法能够准确地测量农机前轮转向角度，最终控制直播机稳定追踪目标角度，满足水田农机前轮转角估计精度要求。

3.3　直线跟踪试验

第 1 次结果如图 10 所示，测试现场效果图如图 11 所示，直播机位置偏差多数保持于负值，表明直播机偏向一方行驶，误差保持在较小范围内，没有出现突变。对直线跟踪误差进行统计，结果如表 4 所示，在地况较好的水田环境下，位置偏差极值为 7.32 cm，平均绝对误差为 3.14 cm，位置偏差标准差为 2.11 cm。相对于采用 GNSS 航向微分和 MEMS 陀螺仪测量值的路径跟踪控制[36]结果位置偏差绝对值极值减小 3.18 cm，平均绝对误差减小 2.46 cm，位置偏差标准差减小 0.91 cm。试验表明基于双观测值融合卡尔曼滤波器的水田作业农机轮向轮角估计方法能够很好地执行控制指令，适用于水田无人驾驶，在水田环境下可以替代直连式角度传感器满足农机导航控制的要求。

表 3　角度跟踪误差

Tab. 3　Angle tracking error　(°)

次数	平均值	最值	偏差标准差
1	0.01	−1.74	0.42
2	0.17	−1.53	0.37
3	0.23	−1.77	0.43
4	0.09	−1.64	0.39
均值	0.12	−1.67	0.40

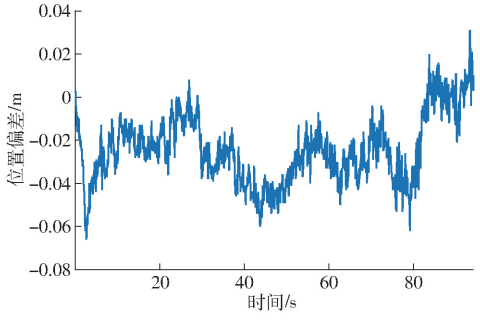


图 10　直线跟踪位置偏差

Fig. 10　Linear tracking position deviation



图 11　测试现场效果图

Fig. 11　Test site renderings

表 4　直线跟踪误差

Tab. 4　Linear tracking error　cm

序号	平均值	极值	偏差标准差
1	−3.60	6.60	1.63
2	−2.23	7.40	1.56
3	−3.79	8.60	2.71
4	−2.97	6.70	2.54
均值	−3.14	7.32	2.11

4　结论

(1)针对水田农机遇到侧滑时速度突变导致转角估计不准确等问题，研究方向盘转向系统的动力

学特性,建立了转向系统传递关系模型,获得了基于电机编码的前轮转角的估计值。采用改进型两轮农机侧滑模型,建立水田农机在侧滑时运动学方程,获得了基于运动学模型的前轮转角估计值。提出了一种基于双观测值融合卡尔曼滤波器的水田作业农机轮向轮角估计方法,获得农机前轮的虚拟转向角度。

(2)构建水田作业农机转向轮角估计模型,分析水田硬底层对速度的影响,采用速度加权观测融合算法,对车辆速度进行补偿,从而保证在侧滑情况下能够对基于运动学模型的前轮转向角度进行准确估计。

(3)以水稻直播机为试验平台,在水田中开展速度校正、前轮转向角度估计试验和直线跟踪试验。速度校正试验结果表明水田硬底层高低不平是前轮转角拟合精度不佳的直接原因,所提方法将直播机速度稳定在一定范围内,解决了因水田硬底层起伏变化造成前轮转角拟合精度不佳的问题。前轮转向角度估计试验表明,农机前轮估计角度相对角度传感器角度变化的跟踪误差平均值为 0.12°,偏差最大值为 1.67°,偏差标准差为 0.4°。本文所提方法能够准确地测量农机前轮转向角度,最终控制直播机稳定追踪目标角度,满足水田农机前轮转角估计的精度要求。直线跟踪试验结果表明,在水田环境下,平均绝对误差为 3.14 cm,位置偏差标准差为 2.11 cm。

参 考 文 献

[1] 罗锡文,廖娟,汪沛,等. 提高农业机械化水平促进农业现代化发展[J]. 中国农村科技,2021(1):6 - 11.
LUO Xiwen,LIAO Juan,WANG Pei,et al. Improving the level of agricultural mechanization and promoting the development of agricultural modernization[J]. China Rural Science & Technology,2021(1):6 - 11. (in Chinese)

[2] 潘彪,田志宏. 农业机械化高速发展阶段的要素替代机制研究[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9): 1 - 10.
PAN Biao, TIAN Zhihong. Study on factor substitution mechanism in the high-speed development stage of agricultural mechanization[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(9):1 - 10. (in Chinese)

[3] 赵春江. 农业知识智能服务技术综述[J]. 智慧农业(中英文),2023,5(2):126 - 148.
ZHAO Chunjiang. Agricultural knowledge intelligent service technology:a review[J]. Smart Agriculture,2023,5(2): 126 - 148. (in Chinese)

[4] 罗锡文,胡炼,何杰,等. 中国大田无人农场关键技术研究与建设实践[J]. 农业工程学报,2024,40(1):1 - 16.
LUO Xiwen,HU Lian,HE Jie,et al. Research and construction practice on key technologies of China datian unmanned farm[J]. Transactions of the CSAE,2024,40(1):1 - 16. (in Chinese)

[5] XIE Binbin,JIANG Houkang,CAI Lianjiang,et al. Research progress of autonomous navigation technology for multi-agricultural scenes[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2023,211: 107963.

[6] TU Tuanpeng,HU Lian,LUO Xiwen, et al. Method and experiment for quantifying local features of hard bottom contours when driving intelligent farm machinery in paddy fields[J]. Agronomy,2023,13: 1949.

[7] 何杰,满忠贤,胡炼,等. 履带式花生联合收获机路径跟踪控制方法与试验[J]. 农业工程学报,2023,39(1):9 - 17.
HE Jie,MAN Zhongxian,HU Lian,et al. Path tracking control method and experiment of crawler peanut combine harvester[J]. Transactions of the CSAE,2023,39(1):9 - 17. (in Chinese)

[8] 杨洋,张刚,查家翼,等. 基于直流电机与全液压转向器直联的自动转向系统研究[J]. 农业机械学报,2020,51(8):44 - 54.
YANG Yang,ZHANG Gang,ZHA Jiayi ,et al. Research on automatic steering system based on direct connection between DC motor and full hydraulic steering gear [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(8):44 - 54. (in Chinese)

[9] MIAO Hequan,DIAO Peisong,YAO Wenyan,et al. Stability study of time lag disturbance in an automatic tractor steering system based on sliding mode predictive control[J]. Agriculture-Basel,2022,12(12): 1 - 22.

[10] 张闻宇, 张国城, 张智刚, 等. 基于 ARMAX - KF 与速度补偿的拖拉机无前轮传感器转角估计方法[J]. 农业机械学报,2024,55(7):415 - 426.
ZHANG Wenyu,ZHNAG Guocheng ,ZHANG Zhigang, et al. Estimation method of tractor rotation angle without front wheel sensor based on ARMAX - KF and speed compensation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(7):415 - 426. (in Chinese)

[11] 杜娟,李敏,金诚谦,等. 拖拉机自动转向试验台研制[J]. 智慧农业(中英文),2019,1(2):85 - 93.
DU Juan,LI Min,JIN Chengqian,et al. Development of tractor automatic steering test-bed[J]. Smart Agriculture,2019,1(2): 85 - 93. (in Chinese)

[12] 郭孔辉,李宁,景立新. 基于转向试验的车辆主销定位参数完整解算[J]. 农业机械学报,2011,42(10):1 - 5.
GUO Konghui,LI Ning,JING Lixin. Complete solution of vehicle kingpin positioning parameters based on steering test [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(10):1 - 5. (in Chinese)

[13] HU Jingtao,LI Taochang. Cascaded navigation control for agricultural vehicles tracking straight paths[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering,2014,7(1): 36 - 44.

[14] 胡书鹏,尚业华,刘卉,等. 拖拉机转向轮转角位移式和四连杆式间接测量方法对比试验[J]. 农业工程学报,2017,33(4):76 - 82.

HU Shupeng, SHANG Yehua, LIU Hui, et al. Comparative test of tractor steering wheel angular displacement and four-bar indirect measurement methods[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(4): 76 - 82. (in Chinese)
[15] LEE S Y, YANG H W. Navigation of automated guided vehicles using magnet spot guidance method[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2012, 28(3): 425 - 436.
[16] KRAUS T. High-speed adaptive nonlinear predictive control for autonomous tractor navigation[C]//Bio-Robotics, 2013: 135 - 140.
[17] WU Yiyang, XIE Zhijiang, LU Ye. Steering wheel AGV path tracking control based on improved pure pursuit model[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2093(1): 012005.
[18] QIAO N, WANG L, ZHU W, et al. An improved pathtracking controller with mid-angle adaptive calibration for combine harvester[J]. Journal of Instrumentation, 2020, 15(1): 1 - 17.
[19] ROBERTO S B. New method for railway track quality identification through the safety dynamic performance of instrumented railway vehicle[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2016, 38(8): 2265 - 2275.
[20] 张智刚,王桂民,罗锡文,等. 拖拉机自动驾驶转向轮角检测方法[J]. 农业机械学报,2019,50(3):352 - 357.
ZHANG Zhigang, WANG Guimin, LUO Xiwen, et al. Detection method of steering wheel angle of tractor automatic driving [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 352 - 357. (in Chinese)
[21] 陈云,何艳. 基于 GNSS 姿态与电机编码器的农机转向角度测量系统研制[J]. 农业工程学报,2021,37(10):10 - 17.
CHEN Yun, HE Yan. Development of agricultural machinery steering angle measurement system based on GNSS attitude and motor encoder[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(10): 10 - 17. (in Chinese)
[22] MUHAMMAD A Z, HAIRI Z, SAIFUL A M, et al. Vehicle path tracking using future prediction steering control[J]. Procedia Engineering, 2012, 41: 473 - 479.
[23] 何杰,高维炜,王辉,等. 基于 MEMS 陀螺仪的农机转向轮角测量方法[J]. 中国农机化学报,2020,41(4):123 - 129.
HE Jie, GAO Weiwei, WANG Hui, et al. Measuring method of steering wheel angle of agricultural machinery based on MEMS gyroscope[J]. Journal of Chinese Agricultural Machanization, 2020, 41(4): 123 - 129. (in Chinese)
[24] 缪存孝,楚焕鑫,孙志辉,等. 基于双 GNSS 天线及单陀螺的车轮转角测量系统[J]. 农业机械学报,2017,48(9):17 - 23.
MIAO Cunxiao, CHU Huanxin, SUN Zhihui, et al. Wheel angle measurement system based on dual GNSS antenna and single gyro[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 17 - 23. (in Chinese)
[25] SHU Tian, ZHENG Yonggan, SHI Zhongke. Image processing-based wheel steer angle detection[J]. Journal of Electronic Imaging, 2013, 22(4): 043005.
[26] 高雷,胡静涛,李逃昌,等. 以角速度为转向动作反馈的拖拉机自动导航控制系统[J]. 农机化研究,2015,37(3):25 - 29.
GAO Lei, HU Jingtao, LI Taochang, et al. Tractor automatic navigation control system with angular velocity as steering action feedback[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(3): 25 - 29. (in Chinese)
[27] PAUL D. Navigation using inertial sensors[J]. IEEE Aerospace & Electronic System Magazine, 2015, 2(2): 42 - 69.
[28] 王鹤,胡静涛,高雷. 农业机械自动导航车轮转角测量误差补偿模型[J]. 农业机械学报,2014,45(8):33 - 37.
WANG He, HU Jingtao, GAO Lei. Error compensation model for automatic navigation wheel angle measurement of agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 33 - 37. (in Chinese)
[29] 朱思洪,马佳富,袁加奇,等. 水田作业工况的拖拉机振动特性[J]. 农业工程学报,2016,32(11):31 - 38.
ZHU Sihong, MA Jiafu, YUAN Jiaqi, et al. Vibration characteristics of tractors in paddy field[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(11): 31 - 38. (in Chinese)
[30] WANG Pei, HU Lian, HE Jie, et al. Method for measuring the steering wheel angle of paddy field agricultural machinery by integrating RTK - GNSS and dual-MEMS gyroscope[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2022, 15(6): 197 - 205.
[31] HE J, HU L, WANG P, et al. Path tracking control method and performance test based on agricultural machinery pose correction [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 200: 107185.
[32] 胡映,陈志环. 侧滑和打滑下的轮式移动机器人轨迹跟踪控制[J]. 计算机应用, 2024, 44(7): 2294 - 2300.
HU Ying, CHEN Zhihuan. Trajectory tracking control of wheeled mobile robot under sideslip and skidding[J]. Journal of Computer Application, 2024, 44(7): 2294 - 2300. (in Chinese)
[33] TU Tuanpeng, HE Jie, LUO Xiwen, et al. Methods and experiments for collecting information and constructing models of bottom-layer contours in paddy fields[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2023, 207: 107719.
[34] 陈翔,许男,郭孔辉. 基于 Padé 模型降阶法的车辆侧倾动力学研究[J]. 农业工程学报,2017,33(17):91 - 97.
CHEN Xiang, XU Nan, GUO Konghui. Study on vehicle roll dynamics based on the order reduction method of Padé model[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(17): 91 - 97. (in Chinese)
[35] 孙小君,周晗,沈海滨,等. 加权融合鲁棒增量 Kalman 滤波器[J]. 电子与信息学报,2021,43(12):3680 - 3686.
SUN Xiaojun, ZHOU Han, SHEN Haibin, et al. Weighted fusion robust incremental Kalman filter[J]. Journal of Electronics and Information, 2021, 43(12): 3680 - 3686. (in Chinese)
[36] 何杰,高维炜,王辉,等. 基于 GNSS 航向微分和 MEMS 陀螺仪的农机轮角测量方法[J]. 华南农业大学学报,2020,41(5):91 - 98.
HE Jie, GAO Weiwei, WANG Hui, et al. Measuring method of agricultural machinery wheel angle based on GNSS heading differential and MEMS gyroscope[J]. Journal of South China Agricultural University, 2020, 41(5): 91 - 98. (in Chinese)