

# 基于干扰观测器的直播机路径跟踪快速终端滑模控制

武涛<sup>1</sup> 李彦明<sup>1</sup> 林洪振<sup>1,2</sup> 贡亮<sup>1</sup> 刘成良<sup>1,2</sup>

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240; 2. 机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240)

**摘要:** 针对农田中存在不确定性干扰时,会导致建立的无人水稻直播机运动学模型精确度不高,从而使路径跟踪收敛时间长,跟踪效果较差等问题,提出由直播机运动学模型建立相应的非线性干扰观测器从而实现不确定性复合干扰的精确观测。将观测到的干扰值补偿到运动学模型中以提高模型的精度,降低滑模控制的抖振。为了控制直播机沿指定路径作业并提高路径跟踪收敛时间,设计了一种快速终端滑模控制算法。基于李雅普诺夫判据检验了算法闭环系统的稳定性。使用 Matlab/Simulink 建立了农机运动学仿真模型,仿真结果表明,非线性干扰观测器能精确观测出系统的不确定性干扰。与不带干扰观测器的滑模控制算法相比,本文控制算法可有效减少收敛时间,抑制干扰带来的抖振。无人直播机水田作业实验表明,采用本文所提出的算法以 1.2 m/s 的速度高效作业时,横向平均绝对偏差为 0.024 7 m,均方差为 0.031 1 m。并且转弯收敛速度快,无超调,路径跟踪精度满足实际作业要求。

**关键词:** 无人水稻直播机; 路径跟踪; 干扰观测器; 快速终端滑模控制

**中图分类号:** S223.2<sup>+</sup>3; TP242.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)12-0024-08

**OSID:**



## Fast Terminal Sliding Mode Control for Autonomous Rice Seeding Machine Based on Disturbance Observer

WU Tao<sup>1</sup> LI Yanming<sup>1</sup> LIN Hongzhen<sup>1,2</sup> GONG Liang<sup>1</sup> LIU Chengliang<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

2. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Due to the existence of uncertainty disturbance, the accuracy of the established kinematics model of the autonomous rice seeding machine was not of highly accuracy, which would lead to problems such as slow convergence time and poor path tracking effect. Firstly, in order to improve the accuracy of the kinematics model and reduce the convergence time, the fast terminal sliding mode control algorithm was proposed based on the unmanned rice seeding machine. To realize the accurate observation of the unknown disturbance, the corresponding nonlinear disturbance observer was established according to the kinematics model, and the disturbance observed would be compensated to the controller. Next, the stability of the control system was proved according to Lyapunov criterion. Then, the kinematics simulation model of the agricultural machinery was built by Matlab/Simulink. The simulation results showed that the uncertain disturbance can be accurately observed by the disturbance observer. The control algorithm had better performance than sliding mode control algorithm without disturbance observer, which can effectively reduce the convergence time and almost had no chattering phenomenon. Finally, an experiment in a paddy field was carried out. When machine worked efficiently at the speed of 1.2 m/s, the absolute average lateral deviation was 0.024 7 m, and the mean square error was 0.031 1 m. The turning speed was also fast and there was no overshoot phenomenon. The results showed that the path tracking effect of the algorithm proposed was of high performance and can satisfy the actual operation requirements well.

**Key words:** unmanned rice seeding machine; path tracking; disturbance observer; fast terminal sliding mode control

收稿日期: 2021-01-05 修回日期: 2021-02-03

基金项目: 上海市科技兴农项目(沪农科推字(2019)第4-3号)

作者简介: 武涛(1996—),男,博士生,主要从事农机自动驾驶与自主作业研究,E-mail: wutaosjtu@sjtu.edu.cn

通信作者: 李彦明(1971—),男,副教授,主要从事非结构化环境下移动机器人自主导航与自主作业研究,E-mail: ymli@sjtu.edu.cn

## 0 引言

在土壤特性复杂多变,高度非结构化的水田环境下,农业机械(农机)本身会受到许多不确定性因素干扰,这给智能农机精确地按照既定轨迹自动驾驶带来了极大困难。要求使用的控制算法具备一定抗干扰和自适应能力,才能保证农机自动驾驶具有较高的精度和稳定性。

国内外学者在农机自动驾驶路径跟踪控制算法上已进行了广泛研究<sup>[1-2]</sup>。主要集中在建立农机的运动学<sup>[3-9]</sup>、动力学<sup>[10-14]</sup>或纯追踪模型<sup>[15-18]</sup>,以及常用的模糊控制<sup>[19-22]</sup>、PID 控制<sup>[23-25]</sup>、最优控制<sup>[26]</sup>和滑模控制<sup>[27-30]</sup>等控制方法上。由于运动学模型简单高效,对参数精确度要求较低,因此将农机简化为二轮车,用一些状态变量描述农机位置和姿态能建立较为准确的农机运动学模型。文献[3,5]较早建立了拖拉机的二轮车运动学模型,并将航向角偏差、横向偏差和车轮转角误差作为参量设计自动驾驶控制算法。建立的二轮车运动学模型适用于任何前轮转向的车辆,控制算法可以对自动耕作系统所需的各种轨迹进行较为精确的跟踪。由于农田中地况复杂,农机负载多变,因此农机的运动学模型与实际系统会有一定偏差。

为保证控制的鲁棒性,需要更高阶的动力学模型来保证精确的横向控制。文献[10]基于大量实验提出一种农机偏航动力学模型系统,在速度 8 m/s 的情况下也能保证拖拉机的横向位置精度。文献[14]建立了农机的二轮车动力学模型,应用扩展卡尔曼滤波理论和农机状态方程估计出无法测量的状态参数。总的来说,动力学模型对参数的精确度要求较高,但在实际工程中车辆和田地的参数又很难准确获得。因此为避免建模不准确导致控制效果较差等问题,有学者提出一种几何控制方法——纯追踪控制。文献[16]提出的纯追踪算法,前视距离由 BP 神经网络确定,并将其应用于农机地边界调头导航。文献[18]针对插秧机自动导航建立模糊控制器,以速度和横向位置偏差作为输入,输出纯追踪算法的前视距离。虽然纯追踪控制能有效避免由模型不准确带来的问题,但对前视距离的计算精度要求较高,否则会引起控制过程中的振荡。PID 控制结构简单,适应性强,因此也经常被应用于农机导航控制。但 PID 控制的主要问题在于针对不同工况时参数整定,以及控制超调和响应时间较为困难。

滑模变结构控制因其对扰动不敏感、调节参数少、响应速度快等优点被广泛应用于非线性控制中。文献[27]针对农用履带机器人提出了一种基于等

效控制和切换控制的自适应滑模控制策略,并根据农机运动学模型和电机驱动特性设计了一种变倾斜参数的自适应积分滑模切换函数。该自适应滑模控制方法具有较高的抗干扰性,但控制过程中会有抖振发生。滑模控制的缺点主要是控制的不连续性会引起抖振以及收敛时间无限等。为解决此问题,文献[29]使用自适应滑模控制来提高农机自动转向控制精度,滑模面采用非线性积分的形式。同时通过使用模糊控制方法来自适应调节滑模控制的开关增益以减轻控制输入抖振现象。文献[30]同样在滑模控制中使用模糊控制方法抑制抖振,提高了农机的导航控制精度,但不能保证收敛时间。

针对滑模控制的抖振和收敛时间无限等问题,本文设计一种带非线性干扰观测器的快速终端滑模控制算法,以提高水稻直播机在水田环境下的抗干扰能力和路径跟踪精度。

## 1 基于干扰补偿的农机运动学模型

由于水田环境下土壤特性复杂,难以建立准确的直播机动力学模型,因此选择建立带滑移和转向干扰补偿的农机运动学模型。如图 1 所示,不考虑农机动力学特性,将直播机的运动学模型简化为二轮车模型<sup>[31]</sup>。图中, $M(x_m, y_m)$ 为后轮中心,车体控制点; $T(x_t, y_t)$ 为  $M$  点在期望路径  $T$  上的垂足; $\theta_p$ 为  $y$  轴与期望路径的夹角,即航向角的期望值。根据以下 5 组参数来描述直播机的位姿:直播机后轮中心的大地坐标与期望路径的距离、前轮转角、行驶速度、农机行驶方向与期望路径之间的航向角偏差、前后轮轴距。

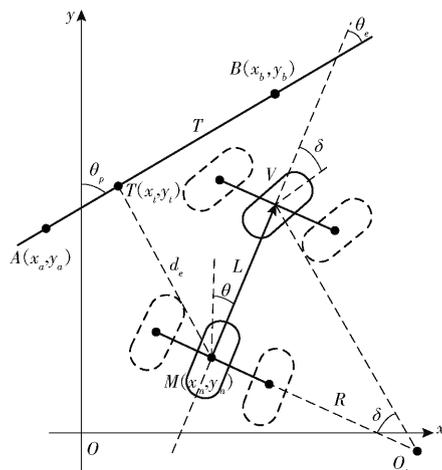


图 1 水稻直播机运动学模型

Fig. 1 Schematic of kinematic model of rice seeding machine

由于期望路径  $AB$  固定,所以航向角偏差的导数与航向角速度相等,即

$$\dot{\theta}_e = \dot{\theta} = \frac{V}{R} \quad (1)$$

式中  $V$ ——行进速度, m/s

$R$ ——直播机转弯半径, m

$\theta$ ——航向角, ( $^\circ$ )

$\theta_e$ ——航向角偏差, ( $^\circ$ )

由图中几何关系可得

$$R = \frac{L}{\tan\delta} \quad (2)$$

式中  $L$ ——前后轮轴距, m

$\delta$ ——前轮转角, 控制输入, ( $^\circ$ )

所以

$$\dot{\theta}_e = \frac{V \tan\delta}{L} \quad (3)$$

横向偏差的导数即为速度  $V$  在该方向上的分量, 即

$$\dot{d}_e = V \sin\theta_e \quad (4)$$

式中  $d_e$ ——横向偏差, m

以横向偏差  $d_e$  和航向角偏差  $\theta_e$  为状态变量, 同时考虑水田中地况复杂多变, 为避免未知干扰导致建模不准确和滑模控制器抖振现象发生, 特引入农机的滑移和转向干扰。由式(3)、(4)可得带干扰的直播机运动学模型的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{d}_e = (V - V^R) \sin(\theta_e + \theta_e^R) \\ \dot{\theta}_e = \frac{(V - V^R) \tan(\delta + \delta^R)}{L} \end{cases} \quad (5)$$

式中  $V^R$ ——滑移速度干扰, m/s

$\theta_e^R$ ——航向角滑移干扰, ( $^\circ$ )

$\delta^R$ ——前轮转向干扰, ( $^\circ$ )

引入复合干扰项: 横向位置干扰  $|\xi| \leq P$  和航向角干扰  $|\zeta| \leq K$ ,  $P$  和  $K$  为干扰的最大值, 之后用非线性干扰观测器对其进行精确观测, 并补偿到控制器中。复合干扰综合滑移和转向干扰后的直播机运动学模型为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \dot{d}_e = V \sin\theta_e + \xi \\ \dot{x}_2 = \dot{\theta}_e = \frac{V \tan\delta}{L} + \zeta \end{cases} \quad (6)$$

式中  $x_1$ ——横向偏差, m

$x_2$ ——航向角偏差, ( $^\circ$ )

## 2 非线性干扰观测器设计

由于在实际工作过程中直播机受到的复合干扰很难直接获得, 因此建立非线性干扰观测器对其进行观测。令

$$f(x(t), u(t), t) = \begin{bmatrix} V \sin\theta_e \\ \frac{V \tan\delta}{L} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$d(t) = \begin{bmatrix} \xi \\ \zeta \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中  $x(t)$ ——状态变量

$d(t)$ ——复合干扰

$u(t)$ ——控制输入, 即前轮转角  $\delta$

由式(6)可知, 直播机状态方程为

$$\dot{x} = f(x(t), u(t), t) + d(t) \quad (9)$$

令复合干扰  $d$  的估计为  $\hat{d}$ , 求得实际值  $d$  与估计值  $\hat{d}$  的差值, 然后对估计值进行补偿得

$$\begin{aligned} \hat{d} &= L(d_e, \theta_e)(d - \hat{d}) = \\ &= -L(d_e, \theta_e)\hat{d} + L(d_e, \theta_e)d = \\ &= -L(d_e, \theta_e)\hat{d} + L(d_e, \theta_e)(\dot{x} - f) \end{aligned} \quad (10)$$

式中  $L(d_e, \theta_e)$ ——正定的增益矩阵

由于在实际的控制过程中很难通过微分横向偏差  $d_e$  和航向角偏差  $\theta_e$  得到对应的变化率  $\dot{d}_e$  和  $\dot{\theta}_e$ , 因此需改进式(10)中的观测器方程, 令

$$z = \hat{d} - p(d_e, \theta_e) \quad (11)$$

其中  $p(d_e, \theta_e) = L(d_e, \theta_e)x + D$  (12)

式中  $z$ ——辅助向量

$p(d_e, \theta_e)$ ——设计的函数向量

$D$ ——辅助常量矩阵

由式(10)~(12)求得  $z$  的导数

$$\begin{aligned} \dot{z} &= \dot{\hat{d}} - \dot{p}(d_e, \theta_e) = \\ &= -L(d_e, \theta_e)z + L(d_e, \theta_e)(-f - p(d_e, \theta_e)) \end{aligned} \quad (13)$$

因此, 非线性干扰观测器改进后的方程为

$$\begin{cases} \dot{\hat{d}} = z + p(d_e, \theta_e) \\ \dot{z} = -L(d_e, \theta_e)z + L(d_e, \theta_e)(-f - p(d_e, \theta_e)) \end{cases} \quad (14)$$

令复合干扰的观测误差  $e_d = d - \hat{d}$ , 由于观测器和复合干扰的动态特性相比, 前者变化较为迅速, 于是可作出假设  $\dot{d} = 0$ , 所以

$$\dot{e}_d = -\dot{\hat{d}} = -\dot{z} - \dot{p}(d_e, \theta_e) \quad (15)$$

将式(9)、(12)、(14)代入式(15)整理可得

$$\dot{e}_d + L(d_e, \theta_e)e_d = 0 \quad (16)$$

令李雅普诺夫函数  $V_1 = \frac{1}{2}e_d^T e_d$ , 则

$$\dot{V}_1 = e_d^T \dot{e}_d = -e_d^T L(d_e, \theta_e)e_d \leq 0 \quad (17)$$

因此估计误差  $e_d$  渐进收敛, 选取合适的正定增益矩阵  $L(d_e, \theta_e)$  能让估计误差迅速趋于 0, 可准确估计出直播机运动学模型中的复合干扰。

## 3 非奇异快速终端滑模控制器设计

终端滑模<sup>[32]</sup>的设计思想是在滑模面中引入非

线性项,使得系统进入滑模面后能在有限时间内收敛,可解决线性滑模面不适用复杂非线性系统且收敛时间无穷大的问题。传统终端滑模面为

$$S(x) = \dot{x} + \beta x^{\frac{p}{q}} \quad (18)$$

式中  $\beta$ ——非线性项系数,  $\beta > 0$

$p, q$ ——正奇数,  $p > q$

系统收敛时间为

$$t = \frac{p|x_0|^{(p-q)/p}}{\beta(p-q)} \quad (19)$$

但当系统状态远离滑模面时,以上终端滑模控制收敛速度比较慢。而且由于控制律可能会包含带有负指数的项,当该状态趋于零时会导致控制趋于无穷,即产生奇异现象。为解决以上问题,本文设计能使横向偏差  $d_e$  全局快速收敛的快速终端滑模面

$$s = \alpha x_1 + \beta x_1^{\frac{p}{q}} + x_2 \quad (\alpha > 0) \quad (20)$$

式中  $\alpha$ ——线性项系数

将横向偏差  $d_e$  作为重要的路径跟踪精度评价指标。在滑模面的设计中引入  $d_e$  的线性项和非线性幂次项,使得当系统状态远离滑模面时由线性项保证收敛速度,进入滑模面后非线性幂次项起主要作用,从而保证系统具备全局快速收敛的特性。同时控制律中不包含负指数,也不会产生奇异。

趋近律设计为

$$\dot{s} = -k \operatorname{sgn}(s) - \lambda s \quad (21)$$

式中  $k, \lambda$ ——系数,均大于 0

由式(6)、(14)、(20)、(21)设计控制律为

$$\delta = \arctan \left( \frac{L}{V} \left[ -k \operatorname{sgn}(s) - \lambda s - (V \sin \theta_e + \hat{\xi}) \left( \beta \frac{p}{q} d_e^{p/q-1} + \alpha \right) - \hat{\zeta} \right] \right) \quad (22)$$

式中  $\hat{\xi}, \hat{\zeta}$ ——复合干扰观测值

控制律收敛性证明,选取李雅普诺夫函数

$$V_2 = \frac{1}{2} s^2 \quad (23)$$

由式(20)、(21)得

$$\dot{V}_2 = s \dot{s} = s(-k \operatorname{sgn}(s) - \lambda s) \quad (24)$$

当  $s > 0$  时

$$\dot{V}_2 = s(-k \operatorname{sgn}(s) - \lambda s) = -(ks + \lambda s^2) < 0 \quad (25)$$

当  $s < 0$  时

$$\dot{V}_2 = s(-k \operatorname{sgn}(s) - \lambda s) = s(k - \lambda s) < 0 \quad (26)$$

当  $s = 0$  时,  $\dot{V}_2 = 0$ 。

因此  $\dot{V}_2 \leq 0$ , 轨迹跟踪误差收敛,并且由终端滑模的特性可知为全局有限时间收敛。

## 4 仿真验证

使用 Matlab/Simulink 验证本文所提控制算法的有效性。根据图 2 控制系统结构图建立相应的仿真模型。直播机系统仿真模型参数如表 1 所示。

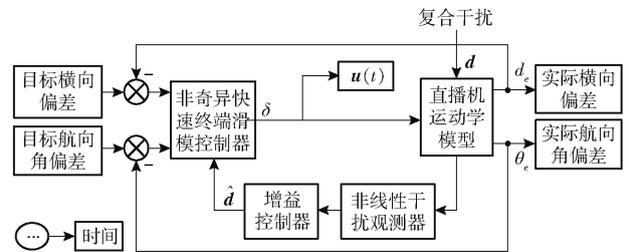


图 2 控制系统结构图

Fig. 2 Block diagram of control system

在无干扰输入的情况下,对比 3 种算法的控制效果:①本文所提的非奇异快速终端滑模。②普通的终端滑模:  $s = \beta x_1^{\frac{p}{q}} + x_2$ 。③传统滑模:  $s = \alpha x_1 + x_2$ 。仿真结果如图 3 所示。可以看出,本文设计的非奇

表 1 控制系统仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters of control system

参数	$V/(m \cdot s^{-1})$	$L/m$	$d_e(\text{初始值})/m$	$d_e(\text{期望值})/m$	$\theta_e(\text{初始值})/(^\circ)$	$\theta_e(\text{期望值})/(^\circ)$	$\alpha$	$\beta$	$p$	$q$	$k$	$\lambda$
数值	1.2	2	-0.6	0	0	0	4	1	5	3	1	1

异快速终端滑模调节时间在 2.5 s 左右,而其它 2 种算法的调节时间都大于 5 s,说明本文提出的算法能使直播机做出快速响应,有效缩短了路径跟踪的收敛时间。

为了验证本文设计的非线性干扰观测器对复合干扰的估计效果,对控制系统模型施加复合干扰。干扰及其估计曲线如图 4、5 所示。由图 4、5 可以看出,观测器对横向位置干扰  $\xi$  和航向角干扰  $\zeta$  的估计值与施加的实际值基本吻合,说明观测器能实现对复合干扰的精确观测,可将观测器的估计值补偿

到直播机运动学模型中以提高模型的准确度。

最后验证将观测器估计值补偿到控制器中能否降低干扰造成的抖振。在施加干扰的情况下,仿真对比了 3 种算法的路径跟踪效果:①带干扰观测的快速终端滑模控制。②不带干扰观测的快速终端滑模控制。③不带干扰观测的传统滑模控制。仿真结果如图 6 所示。3 种算法路径跟踪过程中横向偏差的均方差分别为 0.003 3、0.012 6、0.037 7 m。

从图 6 可知,在有干扰存在但无补偿的情况下,路径跟踪过程中会发生明显的抖振。本文所提的快

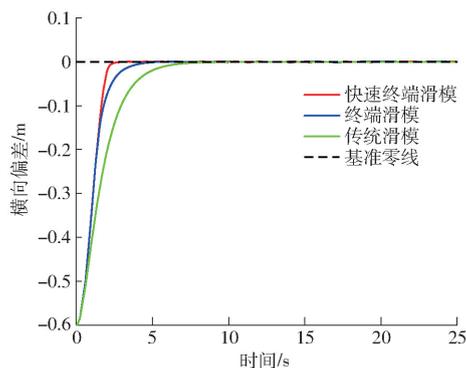


图3 无干扰仿真结果

Fig. 3 Simulation results without disturbance

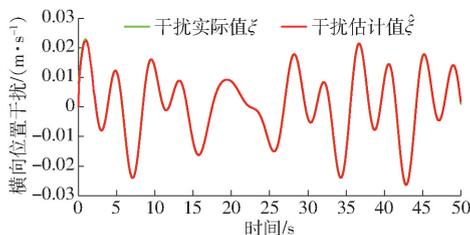
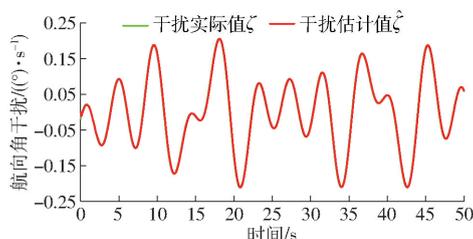
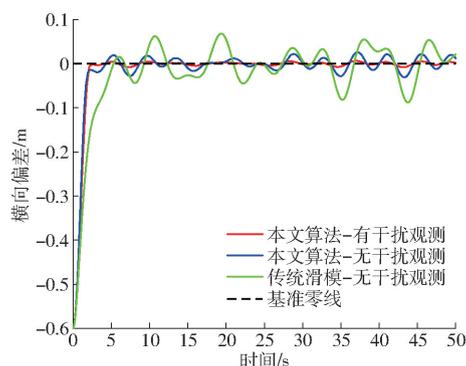
图4 横向位置干扰 $\xi$ 观测结果Fig. 4 Disturbance observation result of  $\xi$ 图5 航向角干扰 $\zeta$ 观测结果Fig. 5 Disturbance observation result of  $\zeta$ 

图6 有干扰仿真结果

Fig. 6 Simulation results with disturbance

速终端滑模控制相比传统滑模控制具备一定的抗抖振能力。当有干扰观测补偿时,系统抖振明显降低,说明采用干扰观测器估计干扰值并补偿到控制器中能有效降低滑模控制抖振,提高路径跟踪控制精度,证明了本文所提控制算法的有效性。

## 5 实验验证

### 5.1 实验平台

对洋马集团生产的 YR10D 型水稻直播机进行

无人化改造,如图7所示。整车自动驾驶控制系统由上位机主控制器通过 CAN/RS-232 的通信方式接收北斗位置信息,并对车身各子控制系统进行控制,各子系统相互协作使得直播机完成自动驾驶和作业。主控制器采用微嵌 Linux 工业计算机,具有 4 核 1.6 GHz 高性能处理器,以及 1 GB DDR3 运行内存,支持 RS-232 串口、CAN 等通信接口。采用北京天海科公司生产的 DWQT-CAN-360-G 型转角传感器,精度为  $0.1^\circ$ 。RTK-GPS 使用 4G 网络差分基站,动态定位精度在 0.02 m 以内,数据更新频率为 20 Hz。方向盘使用直流电机驱动,采用位置-速度双闭环控制。所使用硬件的精度和频率足以应用于农机自动驾驶中。改造后的直播机可实现自动导航、精量播种、容量检测、堵塞报警、自动倒车加种及自动封边作业。同时建立了云平台管理系统,具备路径规划、远程控制、一机多控及多机协同等功能。实现了“智慧在云,智能在端,管控在屏”的设计理念。



图7 实验平台

Fig. 7 Experiment platform

### 5.2 农机作业实验

为验证本文算法在直播机上的实际运行效果,在上海市崇明区上实集团的水田进行实际带种作业。实验前该地块信息已保存到地块管理系统中,作业前只需加载地块信息,将直播机停在起点处,点击开始,直播机即可自主作业。由于本文所设计的控制算法具备较强的自适应性和鲁棒性,并且对参数不敏感,一般情况无需重新调节参数。因此实验时算法参数与表1中仿真参数保持一致即可取得较好的路径跟踪精度。图8为直播机此次作业的行驶轨迹,可以看出行驶轨迹较为平滑,无偏航。为分析本文所提算法的直线跟踪效果,截取7段直线路径进行分析。设定的作业行距为 2.5 m,但由于导航定位存在一定的误差,每段路径相对于理想轨迹都会有一定的横向稳态偏差,路径 1~7 的稳态误差分别为  $-0.0011$ 、 $0.0368$ 、 $-0.0337$ 、 $0.0336$ 、 $-0.0374$ 、 $0.0220$ 、 $-0.0317$  m。

消除稳态偏差后,图9显示了每段路径的横向

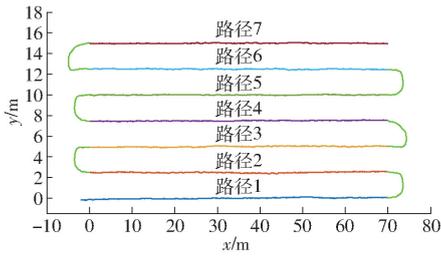


图 8 直播机作业轨迹

Fig. 8 Driving paths of rice seeding machine

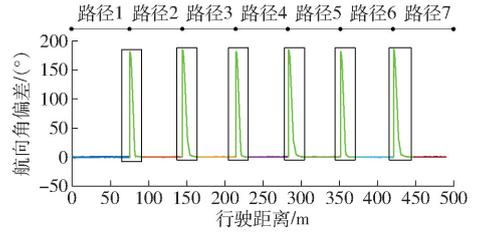


图 10 航向角偏差变化曲线

Fig. 10 Heading angle deviation

-0.128 3 m, 平均绝对偏差为 0.024 7 m, 均方差为 0.031 1 m。最值都出现在路径 1 中, 由于是初始阶段, 所以路径 1 各项数据都较其他稍大, 路径 5 各项数据最小。航向角偏差总体最大值为 4.249 6°, 最小值为 -5.631 8°, 平均绝对偏差为 0.923 6°, 均方差为 1.189 3°, 同样表明本文所提算法具有较优异的路径跟踪效果。并且航向角偏差具有和横向偏差同样的性质, 体现了数据的一致性。

各项实验数据显示, 本文所设计的控制算法在转弯和直线跟踪过程具有快速收敛的特性。通过对复合干扰进行精确观测并补偿到控制器中能有效抑制干扰造成的抖振。本文算法具有优异的路径跟踪效果, 能较好地满足实际播种作业的要求。

## 6 结论

(1) 建立基于干扰补偿的水稻直播机运动学模型, 提出了一种基于非线性干扰观测器的快速终端滑模控制算法。使用 Matlab/Simulink 进行了系统仿真, 结果表明, 本文提出的快速终端滑模控制算法在初始横向偏差为 -0.6 m 时, 调节时间约为 2.5 s, 相比于终端滑模和传统滑模具有全局快速收敛的特点, 且无超调。

(2) 在水稻直播机的运动学模型中加入横向位置干扰和航向角干扰, 并设计非线性干扰观测器对其进行估计。结果显示, 系统的不确定性干扰能被

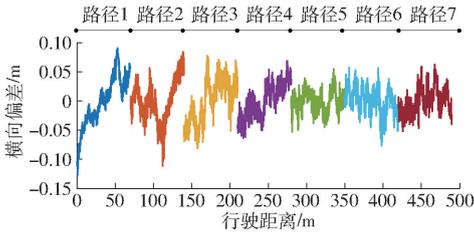


图 9 所有路径横向偏差曲线

Fig. 9 Lateral deviation of all driving paths

偏差, 全过程的航向角变化曲线如图 10 所示。由图 9 可以看出, 除路径 1 外, 所有路径的横向偏差基本都保持在 0.05 m 以内。由于路径 1 是路径跟踪起始阶段, 需要一定的适应和调整时间, 所以此阶段的横向偏差稍大。由图 10 可以看出, 直线行驶阶段航向角偏差基本为零, 每次当直播机行驶到地边界调头时航向角会相差 180°, 之后收敛到 0°, 由图中框出部分可以看出, 本文所提算法的上线效果优异, 收敛速度快, 无超调和抖振发生。

各路径横向偏差的概率分布如图 11 所示, 可以看出, 消除了稳态误差影响后各路径的横向偏差接近服从以 0 为均值的正态分布。说明本文所设计的干扰观测器对复合干扰进行观测补偿后, 有效抑制了直播机在水田环境下的抖振, 使得直线跟踪阶段横向偏差在 0 附近波动幅度较小。各路径跟踪过程中横向偏差和航向角偏差的统计特性如表 2 所示。横向偏差总体最大值为 0.089 5 m, 最小值为

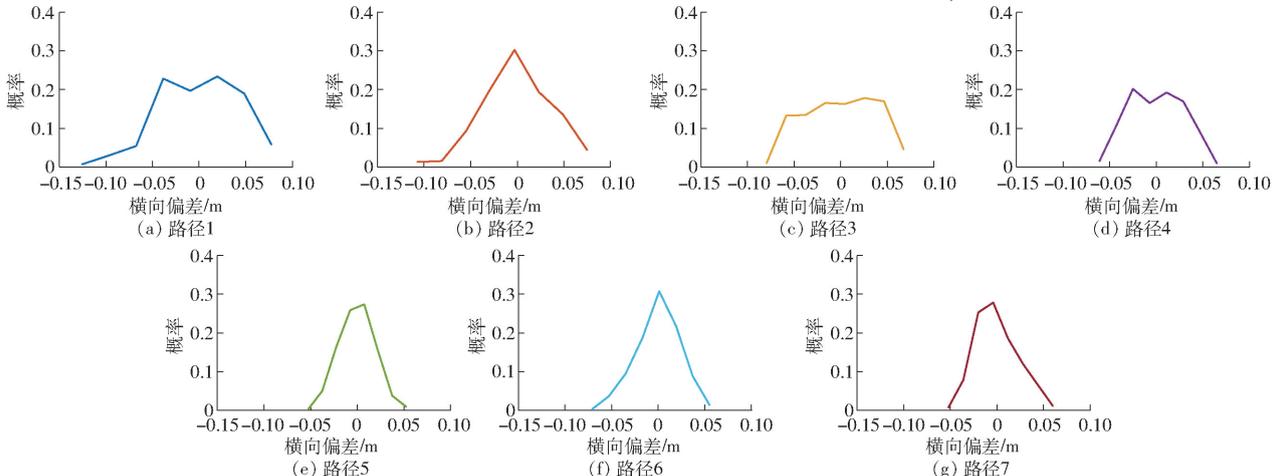


图 11 所有路径横向偏差分布

Fig. 11 Lateral deviation distributions of all driving paths

表2 各路径横向偏差和航向角偏差统计结果

Tab.2 Statistical characteristics of lateral deviation and heading angle deviation of all driving paths

路径	横向偏差/m				航向角偏差/(°)			
	最大值	最小值	平均绝对偏差	均方差	最大值	最小值	平均绝对偏差	均方差
1	0.089 5	-0.128 3	0.035 2	0.042 9	4.249 6	-5.631 8	1.350 9	1.774 2
2	0.084 5	-0.111 4	0.028 4	0.035 8	3.129 5	-3.732 1	0.890 2	1.124 1
3	0.077 9	-0.081 4	0.032 4	0.037 7	3.496 2	-2.913 0	1.022 3	1.234 4
4	0.069 0	-0.063 7	0.024 5	0.028 6	2.485 1	-2.639 5	0.806 8	0.990 8
5	0.055 2	-0.053 0	0.015 0	0.018 3	2.381 6	-2.269 0	0.671 6	0.836 7
6	0.057 2	-0.077 0	0.018 9	0.023 6	2.959 1	-3.234 7	0.940 1	1.158 7
7	0.062 7	-0.051 8	0.018 1	0.022 2	2.678 4	-2.675 4	0.783 0	0.976 6
总体	0.089 5	-0.128 3	0.024 7	0.031 1	4.249 6	-5.631 8	0.923 6	1.189 3

建立的非线性干扰观测器精确地观测出,补偿到滑模控制器后能有效抑制干扰造成的抖振。

(3)以速度1.2 m/s进行了水田播种作业实验,直线跟踪过程中横向平均绝对偏差为0.024 7 m,均方差为0.031 1 m,航向角平均绝对偏差为0.923 6°,

均方差为1.189 3°。偏差总体数值较小,分布集中,并且转弯时收敛速度较快,无超调。本文所提出的快速终端滑模控制算法收敛时间快,所设计的非线性干扰观测器能有效抑制水田环境下不确定性复合干扰对路径跟踪造成的抖振。

#### 参 考 文 献

- [1] 胡静涛,高雷,白晓平,等. 农业机械自动导航技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 1-10. HU Jingtao, GAO Lei, BAI Xiaoping, et al. Review of research on automatic guidance of agricultural vehicles[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10): 1-10. (in Chinese)
- [2] 张漫,季宇寒,李世超,等. 农业机械导航技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 1-18. ZHANG Man, JI Yuhuan, LI Shichao, et al. Research progress of agricultural machinery navigation technology [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 1-18. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20200401&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200401&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.001. (in Chinese)
- [3] O'CONNOR M L. Carrier-phase differential GPS for automatic control of land vehicles[D]. Stanford: Stanford University, 1997.
- [4] GUILLET A, LENAIN R, THUILOT B, et al. Adaptable robot formation control: adaptive and predictive formation control of autonomous vehicles[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2014, 21(1): 28-39.
- [5] BELL T. Precision robotic control of agricultural vehicles on realistic farm trajectories[D]. Stanford: Stanford University, 1999.
- [6] TAGHIA J, WANG X, LAM S, et al. A sliding mode controller with a nonlinear disturbance observer for a farm vehicle operating in the presence of wheel slip[J]. Autonomous Robots, 2017, 41(1): 71-88.
- [7] KAYACAN E, KAYACAN E, RAMON H, et al. Distributed nonlinear model predictive control of an autonomous tractor-trailer system[J]. Mechatronics, 2014, 24(8): 926-933.
- [8] KRAUS T, FERREAU H J, KAYACAN E, et al. Moving horizon estimation and nonlinear model predictive control for autonomous agricultural vehicles[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 98: 25-33.
- [9] 白晓平,胡静涛,高雷,等. 农机导航自校正模型控制方法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 1-7. BAI Xiaoping, HU Jingtao, GAO Lei, et al. Self-tuning model control method for farm machine navigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 1-7. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150201&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150201&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.001. (in Chinese)
- [10] BEVLY D M, GERDES J C, PARKINSON B W. A new yaw dynamic model for improved high speed control of a farm tractor [J]. J. Dyn. Sys., Meas., Control, 2002, 124(4): 659-667.
- [11] DERRICK J B, BEVLY D M. Adaptive steering control of a farm tractor with varying yaw rate properties[J]. Journal of Field Robotics, 2009, 26(6-7): 519-536.
- [12] EATON R, POTA H, KATUPITIYA J. Path tracking control of agricultural tractors with compensation for steering dynamics [C]//Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control (CDC). IEEE, 2009: 7357-7362.
- [13] MATVEEV A S, HOY M, KATUPITIYA J, et al. Nonlinear sliding mode control of an unmanned agricultural tractor in the presence of sliding and control saturation[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2013, 61(9): 973-987.
- [14] BAO Ruixin, LI Yongkui. Kalman filtering design for agricultural vehicle state estimation[C]//2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering (ICEICE), 2011: 4252-4255.
- [15] HUANG Peichen, LUO Xiwen, ZHANG Zhigang. Headland turning control method simulation of autonomous agricultural machine based on improved pure pursuit model[C]//International Conference on Computer and Computing Technologies in

- Agriculture. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009: 176 – 184.
- [16] 黄沛琛, 罗锡文, 张智刚. 改进纯追踪模型的农业机械地头转向控制方法[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(21):216 – 219. HUANG Peichen, LUO Xiwen, ZHANG Zhigang. Control method of headland turning based on improved pure pursuit model for agricultural machine[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(21): 216 – 219. (in Chinese)
- [17] 李逃昌, 胡静涛, 高雷, 等. 基于模糊自适应纯追踪模型的农业机械路径跟踪方法[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(1): 205 – 210. LI Taochang, HU Jingtao, GAO Lei, et al. Agricultural machine path tracking method based on fuzzy adaptive pure pursuit model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1):205 – 210. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20130139&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130139&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.039. (in Chinese)
- [18] 唐小涛, 陶建峰, 李志腾, 等. 自动驾驶插秧机路径跟踪系统稳定性模糊控制优化方法[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(1):29 – 34. TANG Xiaotao, TAO Jianfeng, LI Zhiteng, et al. Fuzzy control optimization method for stability of path tracking system of automatic transplanter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 29 – 34. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20180103&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180103&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.003. (in Chinese)
- [19] 张雁, 李彦明, 刘翔鹏, 等. 水稻直播机自动驾驶模糊自适应控制方法[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(10):30 – 37. ZHANG Yan, LI Yanming, LIU Xiangpeng, et al. Fuzzy adaptive control method for autonomous rice seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 30 – 37. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20181004&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181004&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.004. (in Chinese)
- [20] 王宇. 插秧机自动驾驶控制系统的设计与研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2016. WANG Yu. Design and research of automatic navigation control system for rice transplanter [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2016. (in Chinese)
- [21] 刘兆祥, 刘刚, 籍颖, 等. 基于自适应模糊控制的拖拉机自动驾驶系统[J]. 农业机械学报, 2010, 41(11):148 – 152. LIU Zhaoxiang, LIU Gang, JI Ying, et al. Autonomous navigation system for agricultural tractor based on self-adapted fuzzy control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11):148 – 152. (in Chinese)
- [22] 周建军, 张漫, 汪懋华, 等. 基于模糊控制的农用车路线跟踪[J]. 农业机械学报, 2009, 40(4):151 – 156. ZHOU Jianjun, ZHANG Man, WANG Maohua, et al. Path tracking for agricultural vehicle based on fuzzy control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4):151 – 156. (in Chinese)
- [23] DONG F, HEINEMANN W, KASPER R. Development of a row guidance system for an autonomous robot for white asparagus harvesting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 79(2):216 – 225.
- [24] ZHAO Pan, CHEN Jiajia, SONG Yan, et al. Design of a control system for an autonomous vehicle based on adaptive-PID[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2012, 9(2):44.
- [25] GAO Lei, HU Jingtao, LI Taochang. DMC – PD cascade control method of the automatic steering system in the navigation control of agricultural machines[C]//Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation. IEEE, 2014:2160 – 2166.
- [26] 李逃昌. 基于级联式控制策略的农业机械自动驾驶控制方法研究[D]. 沈阳: 中国科学院沈阳自动化研究所, 2014. LI Taochang. Research on automatic navigation control method based on cascaded control strategy for agricultural machinery [D]. Shenyang: Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- [27] 焦俊, 陈靖, 乔焰, 等. 直流电机驱动农用履带机器人轨迹跟踪自适应滑模控制[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4):64 – 70. JIAO Jun, CHEN Jing, QIAO Yan, et al. Adaptive sliding mode control of trajectory tracking based on DC motor drive for agricultural tracked robot[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(4):64 – 70. (in Chinese)
- [28] YANG Jun, LI Shihua, YU Xinghuo. Sliding-mode control for systems with mismatched uncertainties via a disturbance observer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 60(1):160 – 169.
- [29] LI Taochang, HU Jingtao. Adaptive sliding mode control method based on nonlinear integral sliding surface for agricultural vehicle steering control [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014(2):1 – 10.
- [30] 籍颖, 刘兆祥. 基于模糊补偿的离散全局滑模控制自动驾驶系统研究[J]. 农机化研究, 2015, 37(7):74 – 78. JI Ying, LIU Zhaoxiang. Autonomous navigation system for agricultural tractor based on discrete global sliding mode control with fuzzy compensatory[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(7):74 – 78. (in Chinese)
- [31] LENAIN R, THUILLOT B, CARIOU C, et al. A new nonlinear control for vehicle in sliding conditions; application to automatic guidance of farm vehicles using RTK GPS[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2004, 5:4381 – 4386.
- [32] MAN Z H, PAPLINSKI A P, WU H R. A robust MIMO terminal sliding mode control scheme for rigid robotic manipulators [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1994, 39(12):2464 – 2469.