

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.002

水田环境下水稻直播机自动驾驶控制方法

张 雁¹ 李彦明¹ 刘翔鹏¹ 陶建峰¹ 刘成良¹ 李瑞川²

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240; 2. 山东五征集团, 日照 262399)

摘要: 为了解决无人化水稻直播机在水田里作业时精度不高的问题,提出了一种在不平整泥泞水田环境中的水稻直播机自动驾驶控制方法。首先建立了水稻直播机的运动学模型,基于横向偏差和航向角偏差,提出了一种用于直线作业段的非线性转向控制算法。为了避免水田路面不平坦对定位系统的影响,通过倾角传感器获取车身姿态,修正定位误差。通过检测计算位置与地边的相对距离,实现了地头自动转弯。水田实验结果表明,所提控制方法的路径跟踪平均横向绝对偏差为 0.027 m,具有较好的跟踪精度和稳定性,且自动转弯算法切实有效,提供了一种在水田环境下可行的自动驾驶控制方法。

关键词: 水稻直播机; 水田环境; 自动驾驶; 控制方法

中图分类号: S223.2⁺2; TP29 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)11-0015-08

An Automatic Drive Control Technique for Rice Drill Seeder in Uneven Paddy Fields

ZHANG Yan¹ LI Yanming¹ LIU Xiangpeng¹ TAO Jianfeng¹ LIU Chengliang¹ LI Ruichuan²

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

2. Shandong Wuzheng (Group) Co., Ltd., Rizhao 262399, China)

Abstract: For the purpose of overcoming the obstacles in application of autonomous rice drill seeder in paddy fields, a path tracking algorithm with high accuracy used for steering control during straight traveling in uneven mud paddy fields was introduced. Combining lateral deviation and heading angle deviation as feedback, a nonlinear steering control model was developed in the algorithm. Integrators were added to the nonlinear control model to eliminate the steady-state errors. Moreover, the velocity of vehicle was also taken into account in the model to improve the path tracking accuracy of the algorithm. To avoid the position error caused by incline, the influence caused by the roll angle and the pitch angle of the vehicle on position coordinates given by GPS were taken into account when the vehicle was on a slant. The algorithm about turn control at the edge of the field was introduced. The overall control scheme was implemented and the experiments carried out in arable paddy fields showed that the mean absolute lateral deviation of the algorithm was 0.027 m and the mean heading angle deviation was 0.027°. The path tracking algorithm was able to meet the required precision for autonomous rice drill seeder in paddy fields of China.

Key words: rice drill seeder; paddy fields; automatic drive; control method

0 引言

随着农业机械化和自动化的不断进步,精准农业也得到了显著的发展。无人农机的发展降低了农

业生产成本、提高了质量并且减少了人工投入^[1]。自动驾驶是无人农机核心技术之一。自动驾驶系统使得农机无需驾驶员控制方向盘,并且可以长时间工作,不会因为疲惫而降低作业质量^[2]。因此,相

收稿日期: 2018-06-23 修回日期: 2018-07-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0700505)、上海市青年科技英才杨帆计划项目(18YF1411000)和上海市科技兴农推广项目(沪农科推字(2016)第1-6-1号)

作者简介: 张雁(1995—),男,博士生,主要从事智能农机研究,E-mail: zy950329@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智能装备自动驾驶与自主作业研究,E-mail: ymli@sjtu.edu.cn

对驾驶员,自动驾驶系统在长时间工作时可以更高精度地完成作业任务,提高作业质量,并且可以降低人力成本。随着计算机和传感器技术的进步,农机领域的自动驾驶系统获得了长足的发展且成为研究热点之一^[3]。对于工作在水田等非结构化环境下的水稻直播机等农机装备而言,在非平坦且泥泞易滑的水田环境里实现高精度的路径跟踪和自动驾驶具有重要意义。

在农业自动驾驶系统上,常用的路径跟踪方法有PID控制^[4-5]、模糊控制^[6-8]、纯追踪算法^[9-12]、最优控制^[13-16]等。通常以转向角作为控制变量^[17-18]。在无法获得准确的转向数学模型时,PID控制或模糊控制是农机转向控制最简单的控制方法^[19]。文献[20-22]实现了基于PID控制方法的转向控制器,但是实验结果显示其算法具有较大的超调,且误差较大。WU等^[23]设计了一种串联闭环PID控制器,实验结果显示这种控制器可以提高跟踪精度,但是控制器所需的转向角速度较难测量。文献[24-25]基于模糊控制算法实现了应用于农机的自适应自动驾驶算法。李逃昌^[15]采用模糊控制调整前视距离的纯追踪模型方法在插秧机平台上进行了实验,但实验结果显示路径跟踪时存在大于0.1 m的超调,影响了路径跟踪的精度。ZHANG等^[26]提出了一种综合拖拉机动态信息和跟踪误差的动态路径跟踪算法,具有较好的跟踪精度。HAN等^[27]基于航向角偏差计算转向角实现了一种自动驾驶算法。JAVAD等^[28]实现了一种高精度的非线性跟踪算法,仿真结果显示横向偏差均方根仅1.36 cm。李培新等^[29]基于跟踪误差模型提出一种无人驾驶预测控制方法,仿真结果表明平均横向偏差小于0.1 m,航向角小于1°。但这些算法均未在水田类似的泥泞和非平坦路面测试,无法直接用于水稻直播机的自动驾驶。李革等^[30]用基于速度、路径弯度等线性调整前视距离的改进纯追踪方法在插秧机平台上做了水田实验,实验结果显示作业段平均误差为0.058 m,最大跟踪误差达0.135 m,但实验直线段长度过短,不足20 m。

为实现水稻直播机在水田环境下较高精度的自动驾驶,提出一种在不平坦泥泞水田环境中的水稻直播机自动驾驶控制方法,以实现直线段的高精度路径跟踪和地头自动转向。

1 运动学模型

1.1 模型

在不考虑车胎与地面的相互作用,假设车辆不会发生侧滑俯仰等情况下,水稻直播机可简化为两

轮车模型^[31],如图1所示。模型中所涉及的参数和说明如表1所示。

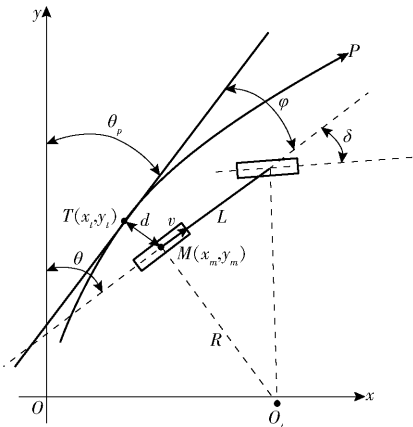


图1 车辆运动学模型

Fig.1 Kinematic model of vehicle

表1 车辆运动学模型中的参数

Tab.1 Parameters in kinematic model

参数	含意
δ	前轮转角,也是控制变量
ω	转向角速度
θ	航向角
θ_p	期望路径 P 在点 T 处切线的航向角
L	水稻直播机轴距
(x, y)	车辆后轴中心点坐标, y 轴正向为正北方向
v	车辆速度
P	车辆跟踪的期望路径
d	横向偏差
φ	航向角偏差
R	车辆转弯半径
$M(x_m, y_m)$	车辆后轴中点坐标
$T(x_t, y_t)$	路径 P 上距 M 最近的点坐标

1.2 农机运动学模型

航向角速度 $\dot{\theta}$ 为

$$\dot{\theta} = \frac{v}{R}$$
(1)

其中

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

由式(1)和式(2)可得

$$\dot{\theta} = \frac{v \tan\delta}{L}$$
(3)

速度 v 在 x 轴方向的分量为

$$\dot{x} = v \sin\theta$$
(4)

速度 v 在 y 轴方向的分量为

$$\dot{y} = v \cos\theta$$
(5)

因此,水稻直播机的运动学模型为

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \sin\theta \\ v \cos\theta \\ \frac{v \tan\delta}{L} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \omega$$
(6)

水稻直播机的运动状态可以用四维向量描述为

$$s = (x, y, \theta, \delta) \quad (7)$$

2 自动驾驶控制方法

水稻直播机的自动驾驶控制方法包括在作业段的直线路径跟踪算法和地头处的自动转弯算法。在直线段应尽量提高跟踪精度,在地头转弯时应尽量提高速度。因为水田坑坑洼洼,不平坦的路面会导致车身倾斜,给农机定位带来一定的误差。为消除这种影响,需要根据车身的倾角对定位数据作出修正。

2.1 不平坦路面的定位修正

在水田环境等不平整路面上行驶时,车身往往会发生倾斜。当定位系统安装在有一定高度的车身上时,会给定位带来误差,如图 2 所示。定位系统测量车辆后轮轴中点 M 的位置作为车辆的位置。在车身横滚角和俯仰角为零时,定位天线测量点在车轴上的投影与 M 重合。在车身倾斜时,定位天线测量点在车辆后轴上的投影与 M 点并不重合,从而无法获得准确的 M 点位置信息。

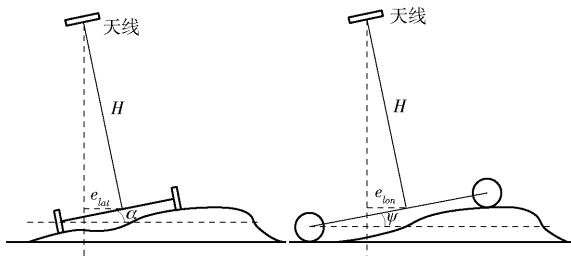


图 2 车身倾斜造成的误差

Fig. 2 Position errors caused by incline

车身倾斜造成的误差有 2 个,一个为横滚角导致的误差 e_{lat} ,一个为俯仰角导致的误差 e_{lon} 。设定天线的安装高度为 H ,横滚角为 α ,俯仰角为 ψ ,则

$$e_{lat} = H \sin \alpha \quad (8)$$

$$e_{lon} = H \sin \psi \quad (9)$$

因此修正后的车辆位置 M 的坐标为

$$\begin{cases} x_m = x'_m + H \sin \psi \cos \theta - H \sin \psi \sin \theta \\ y_m = y'_m + H \sin \psi \sin \theta + H \sin \psi \cos \theta \end{cases} \quad (10)$$

式中 (x_m, y_m) ——修正后的 M 点坐标

(x'_m, y'_m) ——定位系统测量点的坐标

2.2 直线段非线性路径跟踪控制算法

横向偏差 d 的计算方法为

$$d = \sqrt{(x_m - x_t)^2 + (y_m - y_t)^2} \quad (11)$$

设 θ_p 为期望路径 P 在点 T 处切线的航向角,则航向角偏差 φ 为

$$\varphi = \theta_p - \theta \quad (12)$$

横向偏差代表当前的跟踪偏差,而航向角偏差影响随后的跟踪偏差。因此车辆转向时既要考虑横

向偏差也要考虑航向角偏差,可将两者组合起来计算转向角。其中消除航向角偏差 φ 的前轮转角控制量 δ_φ 等于航向角偏差 φ ,即

$$\delta_\varphi = \varphi \quad (13)$$

消除横向偏差 d 的前轮转角控制量 δ_d 为一个非线性反馈控制,为

$$\delta_d = \arctan \frac{k_2 d_{front}}{v} \quad (14)$$

$$d_{front} = d - L \sin \theta \quad (15)$$

其中 k_2 ——可调参数

d_{front} ——前轮的横向偏差

通过对控制算法添加对横向偏差和前进速度的非线性反馈环节,通过反正切变换对反馈输出限幅,同时在速度较快时减小前轮转角输出,可以有效减小超调量,提高稳定性。

结合式 (13) ~ (15),添加积分环节消除稳态误差,基于航向角偏差、横向偏差和车辆前进反馈的非线性控制路径跟踪算法为

$$\delta = \varphi + k_1 \arctan \frac{k_2 (d - L \sin \theta)}{v} + k_i I_{int} \quad (16)$$

其中 I_{int} 为减小静态误差的积分项,为横向偏差 d 在过去一段时间的积分; k_1 、 k_2 和 k_i 为转向算法中根据实际情况可调的参数,代表各项对转向角影响的比重。

2.3 地头自动调头算法

地头自动调头的关键在于识别是否到达地头。可以预先通过手持式定位仪标定作业地块的边界关键点,建立作业地块的数据库,从数据库获得的边界关键点计算出作业地块的边界位置信息。实时计算水稻直播机位置与地边界的距离,在小于阈值 D 时认为车辆到达地头,自动执行调头动作。

对于长江中下游平原地区的水田,地边界大部分可看作直线段,因此可通过计算点到线段的距离来获得车辆与地边的距离,判断是否到达地头,如图 3 所示。 M 为车辆位置, d_{is} 为车辆从 M 到地边 AB 的距离, C 为 M 到 AB 所在直线的垂足。点到线段的距离可以通过计算向量点积获得。

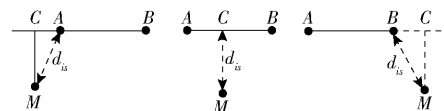


图 3 计算水稻直播机与地边距离的 3 种情况

Fig. 3 Three conditions for calculating distance between rice seeder and border of field

在控制算法识别车辆到达地头后,车辆自动执行调头动作。调头时的控制算法根据作业要求的作业线间距 d_{gap} 得到转向半径 R 为

$$R = \frac{d_{gap}}{2}$$

(17)

结合式(2)得前轮转角 δ 为

$$\delta = \arctan \frac{2L}{d_{gap}}$$

(18)

根据式(18)计算的车辆转角执行转向。转向过程中,当车辆相较于下一条作业线的横向偏差绝对值和航向角偏差绝对值小于预设的阈值时,认为车辆已完成调头,结束调头转向过程,重新执行式(16)的直线路径跟踪算法。

3 算法仿真

通过 1.2 节建立的农机运动学模型,建立如图 4 所示的算法仿真模型。

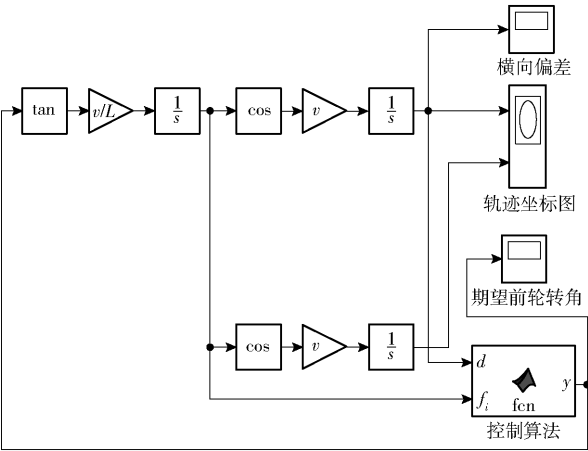


图 4 算法仿真模型
Fig. 4 Algorithm simulation model

图中的控制算法模块内即为预设的路径跟踪算法, d 为横向偏差, f_i 为航向角偏差, y 为输出的前轮转角。分别对本文的路径跟踪算法、纯追踪算法和 PD 控制算法进行仿真。仿真时,初始横向偏差均设为 0.5 m,车辆速度设为 1.5 m/s。文中 k_1 取 1, k_2 取 3, k_i 取 0.05; 纯追踪算法预瞄距离 L_d 取 2 m; PD 控制 K_p 取 1.2, K_d 取 0.8。仿真结果如图 5 所示。

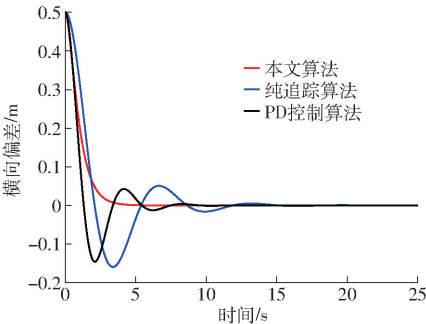


图 5 仿真结果
Fig. 5 Simulation results

由仿真结果可见,本文算法能迅速响应消除横向偏差,超调小,稳定性好。相较于传统的纯追踪算法和

PD 控制算法,本文算法超调量减小 30%,稳定性更好。

4 实验验证

4.1 实验平台

实验平台为上海世达尔公司的洋马 VP6 型水稻直播机,如图 6 所示。该平台搭载了由北斗 GNSS 定位系统、自动转向系统、油门控制系统、导航主控控制器、惯性姿态检测模块、转向角检测模块等组成的自动驾驶控制系统。主控制器为一块 800 MHz 的 ARM Cortex - A8 控制器(AM335X 型,美国德州仪器公司),通过 CAN 总线和串口总线与其他传感器模块、执行模块通信;油门控制系统和转向控制系统分别采用 STM8 作为次级控制器,响应主控命令;用户通过基于 Android 的用户终端远程操控和监测水稻直播机。系统架构如图 7 所示。



图 6 实验平台
Fig. 6 Experiment platform

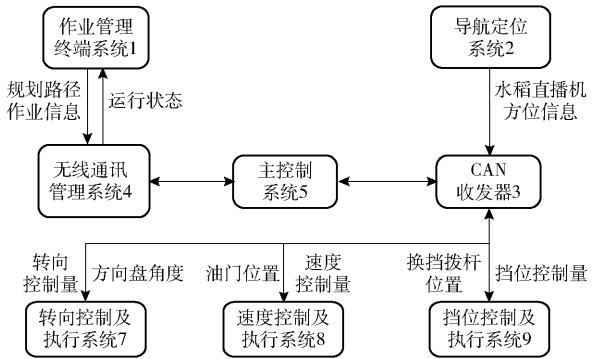


图 7 自动驾驶系统架构
Fig. 7 Framework of autonomous system

为测试本文提出的自动驾驶控制方法的性能,分别在水泥地面以及水田环境下对本文算法进行实验验证。

4.2 实验参数

车辆轴距 L 为 1.05 m,天线安装高度 H 为 2 m。经过参数整定,文中 I_{int} 取车辆过去 20 s 内的横向偏差的积分, k_1 取 1, k_2 取 2.26, k_i 取 0.05。本文实验地头自动调头阈值 D 取 2.9 m,重新上线横向偏差绝对值阈值取 0.3 m,航向角偏差绝对值阈值取 30°。

4.3 水泥地面实验

将水稻直播机的速度设定为 0.8 m/s,在水泥路

面上进行直线行走实验,跟踪直线的横向偏差如图 8 所示。水稻直播机在水泥路面上的直线跟踪横向偏差绝对值最大为 0.026 3 m,平均绝对偏差为 0.006 9 m,跟踪精度较高。

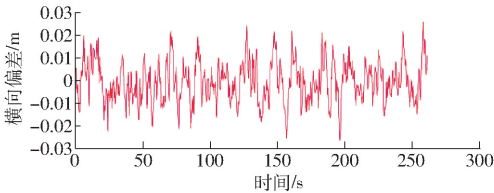


图 8 水泥路面实验的横向偏差曲线

Fig. 8 Deviation curve of path tracking on cement road

4.4 水田实验

尽管水泥地实验表明本文的控制方法具有较高的精度,但是仍然需要水田实验来测试控制算法的有效性。

在实验前先用手持式定位仪将作业水田边界点的位置信息保存在数据库中,并加载到用户终端里。启动自动驾驶前,用户终端根据作业要求将作业路径规划成间隔为 2.5 m 的平行直线段。在水田实验中,车辆速度设为 0.8 m/s,初始横向偏差和航向角偏差为零。实验水田并不平整,车身常有倾斜。经过实验,车辆实际行走轨迹如图 9 所示。图 9 中点划线为地边界,实线为车辆实际行走轨迹。右上角为车辆自动驾驶的起点,右下角为终点。图 10 为用户终端界面实时显示的行走轨迹。

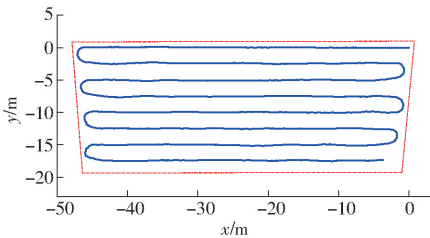


图 9 水田实验车辆行驶轨迹

Fig. 9 Path of rice seeder in paddy field

从图 9 和图 10 中车辆的行走轨迹可以看到,车辆可在地头自动调头进入下一条作业直线段。

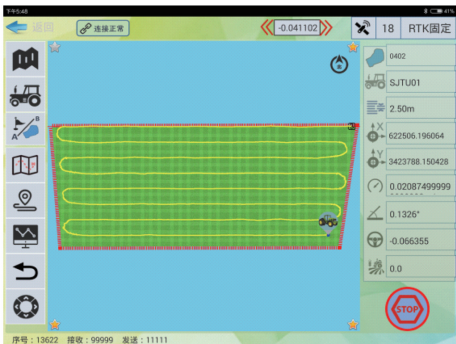


图 10 用户终端界面

Fig. 10 Interface of user terminal

水田实验的所有直线段横向偏差数据如图 11 所示。实际路径跟踪轨迹的效果如图 12 所示。各直线段定义为启动自动驾驶后或调头后第 1 次偏差小于 0.05 m 后到下一次调头前的这段路径。水田实验中所有直线段路径跟踪的偏差数据如表 2 所示。从表 2 可知,每条直线段的横向偏差均方根不超过 0.041 m,总体横向偏差均方根为 0.035 m。每条直线段的平均横向绝对偏差不超过 0.032 m,总体平均横向绝对偏差不超过 0.027 m,总

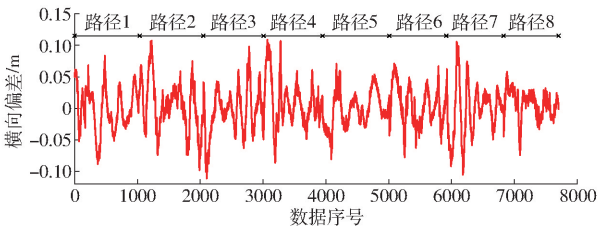


图 11 所有直线段的横向偏差

Fig. 11 Lateral deviations of all straight paths



图 12 车辆水田跟踪效果

Fig. 12 Paths tracking of rice seeder in paddy field

表 2 水田实验中所有直线段路径跟踪偏差

Table 2 Summary of deviation of path tracking in paddy field

路径序号	横向偏差/m					航向角偏差/(°)				
	最大值	最小值	平均绝对偏差	均方根	标准差	最大值	最小值	平均绝对偏差	均方根	标准差
1	0.084	-0.089	0.029	0.035	0.035	6.76	-3.93	0.039	2.29	2.26
2	0.108	-0.098	0.032	0.041	0.040	4.83	-5.79	0.032	2.08	2.02
3	0.098	-0.111	0.028	0.037	0.037	6.78	-3.81	0.028	2.14	2.07
4	0.109	-0.087	0.028	0.038	0.038	5.54	-6.15	0.028	2.08	1.84
5	0.071	-0.081	0.022	0.027	0.027	12.08	-4.72	0.022	2.76	2.56
6	0.071	-0.078	0.026	0.031	0.031	3.49	-5.02	0.026	1.70	1.63
7	0.106	-0.105	0.032	0.041	0.041	6.25	-4.07	0.032	2.36	2.27
8	0.058	-0.074	0.019	0.023	0.023	2.68	-5.77	0.019	1.40	1.40
整体	0.109	-0.111	0.027	0.035	0.035	12.08	-6.15	0.027	2.16	2.08

体平均横向绝对偏差为 0.027 m。航向角平均绝对偏差为 0.027°。

表 3 为横向偏差数据中小于 0.05 m 和 0.10 m 的横向偏差占有所有数据的比例。从表 3 可知,每段直线的横向偏差绝对值都有不小于 76.8% 的比例在 0.05 m 以内,不小于 98.4% 的横向偏差绝对值在 0.10 m 内。在整个实验中,有 85.8% 的横向偏差绝对值在 0.05 m 以内,99.5% 的横向偏差绝对值在 0.10 m 以内。其中,第 1 条、第 5 条、第 6 条和第 8 条直线段,路径跟踪的所有横向偏差绝对值小于 0.10 m。图 13 为各段作业线横向偏差分布图,纵坐标为这段路径横向偏差所在各偏差范围的频率。水田实验结果表明,本文的自动驾驶方法在水田的直

线跟踪上具有较好的跟踪精度,可以完成自动驾驶作业的路径跟踪要求。

表 3 横向偏差小于 0.05 m 和 0.1 m 的数据比例

Tab.3 Ratio of lateral deviation less than 0.05 m and 0.1 m			%
路径序号	小于 0.05 m	小于 0.10 m	
1	85.3	100	
2	76.8	98.4	
3	83.7	99.2	
4	82.0	99.0	
5	95.0	100	
6	88.9	100	
7	77.4	99.1	
8	96.8	100	
整体	85.8	99.5	

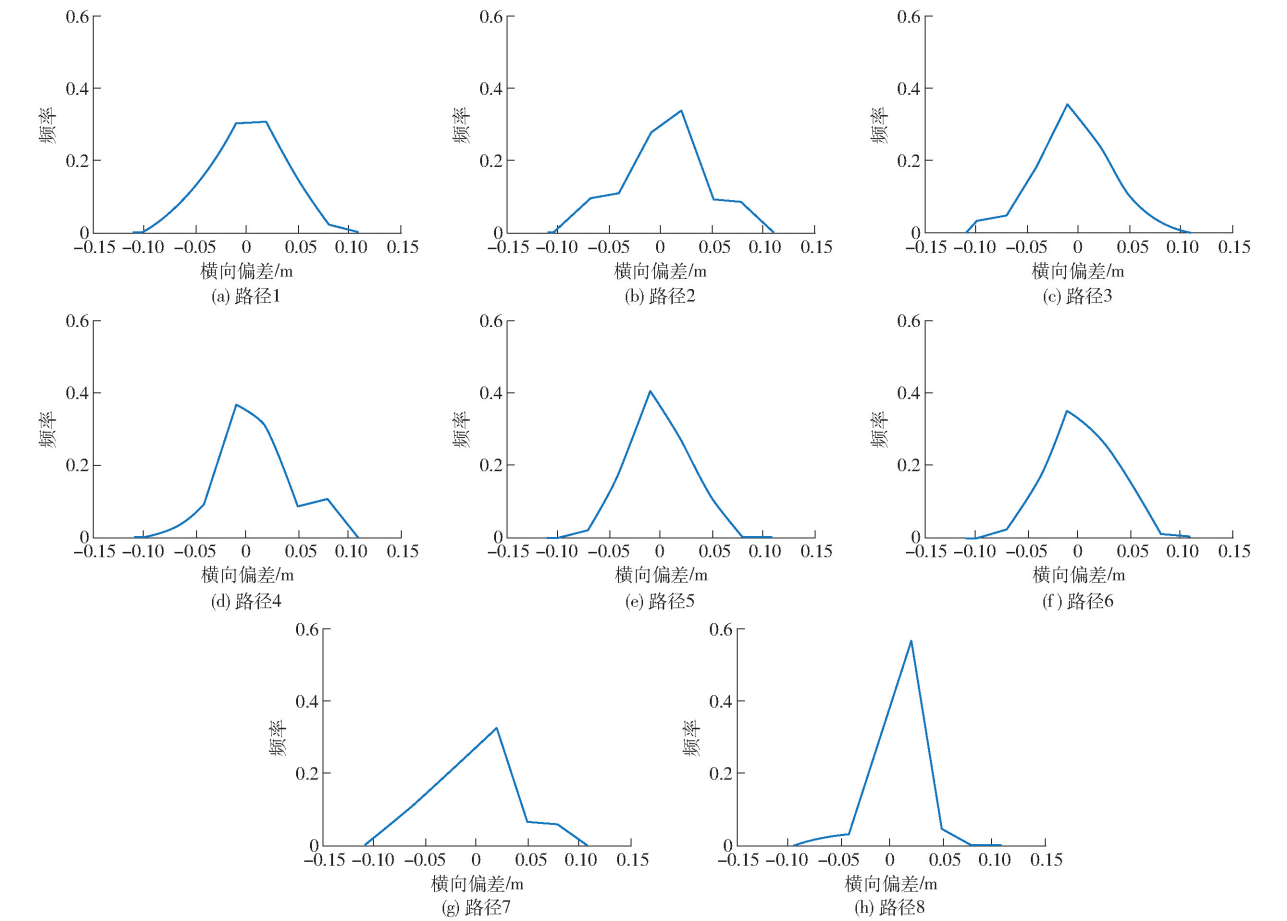


图 13 各段直线的横向偏差分布

Fig. 13 Distribution of lateral deviation of each path

5 结束语

将横向偏差和航向角偏差非线性组合作为反馈,结合积分环节控制方向盘转角实现自动驾驶转向。通过实时计算水稻直播机位置到地边界的距离实现地头自动调头切换作业线。为了提高定位精度,通过姿态传感器获取车身倾角对定位数据做了修正。水泥路面实验结果表明,本文算法在直线跟踪时横向偏差绝对

值最大为 0.026 3 m,平均绝对偏差仅 0.006 9 m。在不平整水田的实验结果表明,本文算法跟踪路径的平均横向绝对偏差总体仅 0.027 m,85.8% 的横向偏差绝对值小于 0.05 m,99.5% 的横向偏差绝对值小于 0.10 m。本文提出的方法在不平整泥泞水田环境中具有较好的鲁棒性,能实现对路径精准的跟踪和地头自动调头切换作业线,有效地改善了水稻直播机在不平整泥泞水田等恶劣环境下自动化作业的精度和效率。

参 考 文 献

- 1 EDAN Y, HAN S, KONDO N. Springer handbook of automation[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2009:1095 – 1128.
- 2 ROLAND L, BENOIT T, CHRISTOPHE C, et al. High accuracy path tracking for vehicles in presence of sliding: application to farm vehicle automatic guidance for agricultural tasks[J]. Autonomous Robots, 2006,21(1):79 – 97.
- 3 WILSON J N. Guidance of agricultural vehicles—a historical perspective[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000,25:3 – 9.
- 4 HU J T, GAO L, HU H C, et al. Design and development of an experiment platform for study on agricultural machinery navigation technology[J]. International Agricultural Engineering Journal,2011, 20(2): 30 – 35.
- 5 罗锡文,张智刚,赵祚喜,等. 东方红 X – 804 拖拉机的 DGPS 自动导航控制系统[J]. 农业工程学报,2009,25(11):139 – 145.
LUO Xiwen, ZHANG Zhigang, ZHAO Zuoxi, et al. Design of DGPS navigation control system for Dongfanghong X – 804 tractor[J]. Transactions of the CSAE,2009, 25(11): 139 – 145. (in Chinese)
- 6 王宇. 插秧机自动导航控制系统的设计与研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2016.
WANG Yu. Design and reasearch of automatic navigation control system for transplanters [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University,2016. (in Chinese)
- 7 刘兆祥,刘刚,籍颖,等. 基于自适应模糊控制的拖拉机自动导航系统[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)
- 8 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)
- 9 汪小昆,鲁伟,陈满,等. 基于改进纯追踪模型的温室采摘运输自动跟随系统[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(12):8 – 13.
[http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20161202&journal_id = jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161202&journal_id=jcsam). DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2016. 12. 002.
WANG Xiaochan, LU Wei, CHEN Man, et al. Automatic following system for greenhouse harvesting transportation based on adaptive pure pursuit model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(12):8 – 13. (in Chinese)
- 10 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. [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.
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. (in Chinese)
- 11 唐小涛,陶建峰,李志腾,等. 自动导航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. [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.
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. (in Chinese)
- 12 张闻宇,丁幼春,王雪玲,等. 基于 SVR 逆向模型的拖拉机导航纯追踪控制方法[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(1):29 – 36. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20160105&journal_id = jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160105&journal_id=jcsam). DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2016. 01. 005.
ZHANG Wenyu, DING Youchun, WANG Xueling, et al. Pure pursuit control method based on SVR inverse-model for tractor navigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(1):29 – 36. (in Chinese)
- 13 O'CONNOR M L. Carrier-phase differential gps for automatic control of land vehicles[D]. Palo Alto: Stanford University,1997:1 – 194.
- 14 O'CONNOR M, BELL T, ELKAIM G,et al. Automatic steering of farm vehicles using GPS[J]. Precision Agriculture, 1996(3):767 – 777.
- 15 李逃昌. 基于级联式控制策略的农业机械自动导航控制方法研究[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)
- 16 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. [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.
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. (in Chinese)
- 17 GARCIA-PEREZ L, GARCIA-ALEGRE M C, RIBEIRO A, et al. An agent of behavior architecture for unmanned control of a farming vehicle[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 60:39-48.
- 18 NORREMARKA M, GRIEPENTROG H W, NIELSEN J, et al. The development and assessment of the accuracy of an autonomous GPS-based system for intra-row mechanical weed control in row crops[J]. Biosystems Engineering, 2008, 101(4): 396-410.
- 19 LI T C, HU J T. 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.
- 20 吴晓鹏, 赵祚喜, 张智刚, 等. 东方红拖拉机自动转向控制系统设计[J]. 农业机械学报, 2009, 40(增刊):1-5.
WU Xiaopeng, ZHAO Zuoxi, ZHANG Zhigang, et al. Development of automatic steering control system based on Dongfanghong tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.):1-5. (in Chinese)
- 21 GAO L, HU J, BAI X, et al. Agro-machinery automatic navigation control system study for precision agriculture applications[C]// Proceedings of the International Conference on Broadcast Technology and Multimedia Communication, 2010: 315-322.
- 22 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):519-536.
- 23 WU X, ZHAO Z, ZHANG Z, et al. Tractor wheels steering control system design based on dual closedloop control[C]// Proceedings of the International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, 2011:294-298.
- 24 吕安涛, 毛恩荣, 宋正河, 等. 一种拖拉机自动驾驶复合模糊控制方法[J]. 农业机械学报, 2006, 37(4):17-20.
LÜ Antao, MAO Enrong, SONG Zhenghe, et al. A complex fuzzy control technique of tractor automatic steering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(4):17-20. (in Chinese)
- 25 CHU J, LI H, CUI P, et al. Fuzzy control of AGV based on vision based in path tracking[J]. International Research Journal of Engineering Science, Technology and Innovation, 2013(2):57-64.
- 26 ZHANG Q, QIU H. A dynamic path search algorithm for tractor automatic navigation[J]. Transactions of the ASAE, 2004, 47(1):639-646.
- 27 HAN X Z, KIM H J, MOON H C, et al. Development of a path generation and tracking algorithm for a Korean auto-guidance tillage tractor[J]. Journal of Biosystems Engineering, 2013, 38(1):1-8.
- 28 JAVAD T, STANLEY L, JAY K. Path following control of an off-road track vehicle towing a steerable driven implement[C]// Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2015:713-718.
- 29 李培新, 姜小燕, 魏燕定, 等. 基于跟踪误差模型的无人驾驶车辆预测控制方法[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(10): 351-357. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20171045&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.045.
- LI Peixin, JIANG Xiaoyan, WEI Yanding, et al. Predictive control method of autonomous vehicle based on tracking-error model [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10):351-357. (in Chinese)
- 30 李革, 王宇, 郭刘粉, 等. 插秧机导航路径跟踪改进纯追踪算法[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(5):21-26. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180502&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.002.
- LI Ge, WANG Yu, GUO Liufen, et al. Improved pure pursuit algorithm for rice transplanter path tracking[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5):21-26. (in Chinese)
- 31 LENAIN R, THUÏLOT 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]// Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004:4381-4386.