

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.11.002

基于运动特性的农机导航控制方法

白晓平^{1,2} 孟鹏^{1,3} 王卓^{1,2} 时佳^{1,2}

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110016;

2. 辽宁省农业装备智能化技术重点实验室, 沈阳 110016; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 农业机械(农机)运动学模型的精度影响导航控制精度和稳定性,为提高农机路径跟踪控制器精度,提出了一种基于运动特性的农机导航控制器设计方法。该方法主要是对传统二轮车运动学模型建模方法进行改进,针对传统二轮车模型小角度近似替代(方向角等于横摆角)的缺点,采用加入侧偏角的方法优化农机运动学建模过程。采用相同的控制方法(状态反馈控制)和不同的运动学模型设计控制器进行对照实验。直线路径跟踪时,侧偏角对模型精度影响较小,引入侧偏角可以在一定程度上影响农机的跟踪精度;曲线路径跟踪时,侧偏角对方向角的变化影响较大,可以大幅影响路径跟踪精度。以安装有自动导航设备的拖拉机为实验平台进行实地实验,结果表明:直线行驶的最大横向误差平均值为0.0454 m,绝对平均误差平均值为0.0149 m,标准差平均值为0.0119 m;曲线行驶的最大横向误差平均值为0.1613 m,绝对平均误差平均值为0.0688 m,标准差平均值为0.0434 m;基于本文提出的优化模型设计的路径跟踪控制器对直线路径跟踪有一定提升,对曲线跟踪精度有大幅提升。

关键词: 农业机械; 控制器; 运动学模型; 导航; 侧偏角; 路径跟踪

中图分类号: TP24

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2021)11-0021-07

OSID:



Control Method for Navigation Based on Kinetic Characteristic of Agricultural Machinery

BAI Xiaoping^{1,2} MENG Peng^{1,3} WANG Zhuo^{1,2} SHI Jia^{1,2}

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

2. Liaoning Provincial Key Laboratory of Agricultural Equipment Intelligent Technology, Shenyang 110016, China

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The accuracy of the kinematics model of agricultural machinery affects the accuracy and stability of navigation control. In order to improve the accuracy of the path tracking controller of agricultural machinery, a design method of navigation controller based on the motion characteristics of agricultural machinery was proposed. The method was mainly an improvement of the traditional two-wheeled vehicle kinematics modeling method. Aiming at the shortcomings of the small-angle approximation replacement (the direction angle was equal to yaw angle) of the traditional two-wheeled vehicle model, the method of adding the slip angle was used to optimize the kinematics modeling process of agricultural machinery. The same control method (state feedback control) and different kinematics models were used to design controllers for control experiments. When tracking a straight path, the slip angle had little effect on the model accuracy, and the introduction of slip angle can affect the tracking accuracy of agricultural machinery to a certain extent. When tracking a curved path, the slip angle had a great impact on the change of the direction angle, which can greatly affect the path tracking accuracy. Using a tractor equipped with automatic navigation equipment as an experimental platform for field experiments. The experimental results showed that the maximum lateral error of straight driving was 0.0454 m, the absolute average error was 0.0149 m and the standard deviation was 0.0119 m. The maximum lateral error of curve driving was 0.1613 m, the absolute average error was 0.0688 m and the standard deviation was 0.0434 m. The data showed that the path tracking controller designed based on

收稿日期: 2020-11-11 修回日期: 2021-02-28

基金项目: 广西创新驱动发展专项资金项目(AA17202013)

作者简介: 白晓平(1986—),男,副研究员,博士,主要从事农业机械导航控制研究,E-mail: baixiaopin@sia.cn

the proposed kinematics model optimization method can improve the linear path tracking to a certain extent, and can greatly improve the curve tracking accuracy.

Key words: agricultural machinery; controller; kinematic model; navigation; slip angle; path tracking

0 引言

随着“智慧农业”的提出,农业机械(农机)自动导航技术已经成为了智能化精准农业中的重要组成部分^[1-8]。为了提高农机导航控制的精度和稳定性,许多学者对农机运动学模型和导航控制方法进行了大量的研究^[9-21]。运动学模型的研究仍旧主要集中在 KELLY^[22]提出的传统“二轮车模型”方面;控制方法的研究则不再局限于传统的输出控制上,路径跟踪模型控制也成了重要的研究方向。由于农机作业环境较差,轮胎与地面作用过程复杂,建立精确的动力学模型比较困难,现有模型多采用传统“二轮车模型”和传统输出控制方法进行导航控制器设计。传统“二轮车模型”的优点是运动学模型简单,考虑因素较少,易于建模;缺点是模型精度较低,会给基于模型的控制方法的控制效果带来不良影响,这会成为进一步提高农机自动导航精度的最大阻碍。

国内外众多学者对路径跟踪控制方法的研究,包括基于农机运动学模型的控制算法和基于农机动力学模型的控制算法^[23-25]。农机运动学模型采用小角度近似化方法简化二轮车运动学模型,主要考虑了农机的运动学约束对农机控制的影响,建模简单,便于设计控制器实现对农机转向的有效控制。但是多处采用小角度近似替代,在曲线跟踪过程中控制系统会存在稳定性变差问题,这种建模方法适用于低速行驶农机或对横向误差要求不是很高的农机。农机动力学模型主要通过车轮与地面之间的复杂作用来对车辆进行建模,在一定环境中可以满足农机路径跟踪时的稳定性控制要求。但是忽略了农机作业环境的复杂性和不确定性,建立动力学模型较为困难。同时,农机作业环境发生改变,基于农机动力学模型设计的控制器也会发生较大偏差,不适用于多种作业环境下的农机建模。

精确的农机运动学模型可以提高路径跟踪控制器的控制品质,减小农机在路径跟踪过程中的误差。传统二轮车运动学模型通常利用后轮为目标点进行运动学分析,采用小角度近似将三角函数转换为线性函数和小角度近似替代而简化运算,只考虑横向偏差和航向偏差,忽略了车辆侧偏角对车辆航向的影响。本文将以前轮质心为目标点进行运动学建模分析,在建立的车辆运动学模型中引入侧偏角,以提

高方向角精度和控制器的收敛速度,减小小角度近似替代带来的误差,并基于该模型进行状态反馈控制器设计。

1 农机运动学模型

1.1 侧向运动分析

图1所示二轮车模型中,左右2个前轮由位于点A的车轮代替,后轮由位于点B的中央后轮代替。前轮转向角用 δ 表示。此模型成立的前提是假设前轮转向,后轮驱动且后轮不可转向。图中坐标系 XOY 为大地坐标系,点C为车辆的瞬时旋转中心,车辆质心为点D,从农机质心到点A和点B的距离分别为 l_f 和 l_r ,农机轴距为 $l=l_f+l_r$, R 为农机旋转半径, v 为农机质心处速度, ψ 为农机当前时刻的航向角, β 为农机侧偏角即车辆质心处速度方向与前后轮轴向之间的夹角,利用三角形内角与外角之间的关系,由 $\triangle CO'A$ 与 $\triangle CO'B$ 可得三角形各内角值。

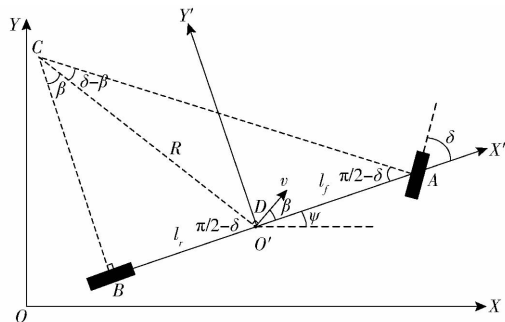


图1 侧向运动示意图

Fig. 1 Schematic of lateral movement

当时间 $t=t_1$ 时,在 $\triangle CDA$ 和 $\triangle CDB$ 上分别使用正弦定理得

$$\frac{\sin(\delta - \beta)}{l_f} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right)}{R} \quad (1)$$

$$\frac{\sin\beta}{l_r} = \frac{\sin\frac{\pi}{2}}{R} \quad (2)$$

将式(1)两侧同时乘以 $\frac{l_f}{\cos\delta}$ 得

$$\tan\delta\cos\beta - \sin\beta = \frac{l_f}{R} \quad (3)$$

由式(3)得

$$\delta = \arctan\left(\frac{l_f}{R\cos\beta} + \tan\beta\right) \quad (4)$$

当时间 $t=t_0$ 时, $\delta=\delta'$, δ' 为上一时刻的输出转

角,将式(1)两侧同时乘以 $\frac{l_f l_r}{\cos\delta}$ 可得

$$l_r \sin\beta + \frac{l_f l_r}{R} = l_r \tan\delta' \cos\beta \quad (5)$$

将式(2)两侧同时乘以 $l_f l_r$ 可得

$$-l_f \sin\beta + \frac{l_f l_r}{R} = 0 \quad (6)$$

可由式(5)减去式(6)得到侧偏角 β 为

$$\beta = \arctan \frac{l_r \tan\delta'}{l_f + l_r} \quad (7)$$

1.2 运动学建模

在不考虑车轮与地面的相互作用,无侧倾、俯仰、侧滑等运动的情况下,可将拖拉机、插秧机等多种四轮农机简化为二轮车模型进行运动学分析。在建模过程中将侧偏角引入农机运动学模型,提高农机方向角的精度。定义速度方向与车辆纵轴方向为侧偏角 β 。农机运动学模型示意图如图2所示。

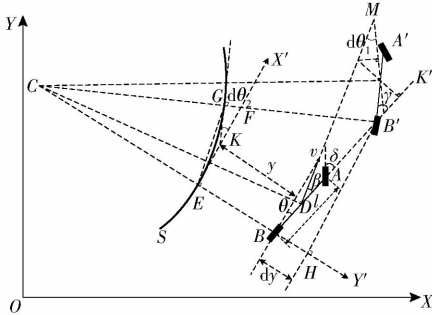


图2 运动学模型示意图

Fig.2 Kinematics model diagram

图2中, S 为理论路径,点 E 和点 G 分别对应 t_1 和 t_2 时刻车辆在理论路径 S 上的位置, EK 和 KG 分别对应点 E 和点 G 的切线, $\beta - \theta$ 为航向偏差角, γ 为航向角变化量, y 为车辆当前位置的横向偏差, dy 为 $dt = t_2 - t_1$ 时间内横向偏差的变化量, $d\theta_1$ 为实际航向角变化量,由图中几何关系可知 $d\theta = \gamma$, $d\theta_2$ 为理论航向角变化量。

当 dt 非常小时,由 $\triangle BB'H$ 得

$$dy = v \cos\beta \sin\theta dt \quad (8)$$

如图2所示 $\triangle CEF \sim \triangle CHB'$,且

$$\begin{cases} l_{CE} = \frac{1}{c(x)} \\ l_{CH} = l_{CE} - y - dy \\ l_{B'H} = v \cos\beta \cos\theta dt \\ l_{EF} \approx dx \end{cases} \quad (9)$$

式中 l_{CE} ——理论路径瞬时旋转半径

l_{CH} ——理论路径瞬时旋转中心到后轮的距离与车辆横向位移之和

$l_{B'H}$ ——实际路径中车辆在相邻时刻 dt 内后

轮移动的距离

l_{EF} ——理论路径中车辆在相邻时刻 dt 内后轮移动的距离

由式(9)可得

$$dx = \frac{v \cos\beta \cos\theta}{1 - c(x)y - c(x)v \cos\beta \sin\theta dt} dt \quad (10)$$

假设曲率 $c(x)$ 和速度 v 均为一个固定范围内的值,当 dt 很小时, $\sin\theta$ 趋向于0, dt 趋向于0,可将 $c(x)v \cos\beta \sin\theta dt$ 近似为0,所以可将式(10)近似化为

$$dx = \frac{v \cos\beta \cos\theta}{1 - c(x)y} dt \quad (11)$$

航向角变化量由2部分组成: $d\theta = d\theta_1 + d\theta_2$,由图2所示几何关系可知

$$\begin{cases} d\theta_1 = \frac{v \cos\beta \tan\delta}{l} dt \\ d\theta_2 = c(x) dx \end{cases} \quad (12)$$

将式(12)代入 $d\theta$ 可得

$$d\theta = v \cos\beta \left(\frac{\tan\delta}{l} + \frac{\cos\theta}{1 - c(x)y} \right) dt \quad (13)$$

综合式(8)、(11)、(13),可得农机运动学模型为

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = v \cos\beta \sin\theta \\ \frac{dx}{dt} = \frac{v \cos\beta \cos\theta}{1 - c(x)y} \\ \frac{d\theta}{dt} = v \cos\beta \left(\frac{\tan\delta}{l} + \frac{c(x) \cos\theta}{1 - c(x)y} \right) \end{cases} \quad (14)$$

实际情况中,曲率 $c(x)$ 和横向误差 y 一般小于1,所以 $1 - c(x)y \neq 0$,在模型推导过程中采用小尺寸近似替代和极小项近似为0的方法,所以实际情况中,曲率 $c(x)$ 越小,模型的精度越高,控制效果也更好。

2 控制器设计

设计控制器的目的是使车辆可以准确跟踪目标曲线,现利用状态反馈控制方法设计控制器。引入虚拟控制量 $u = \frac{d^2 y}{dt^2}$,选取状态量 $\mathbf{X} = \left[y \quad \frac{dy}{dt} \right]$ 。构造二维状态反馈控制系统

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}u$$

其中 $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$

根据线性系统理论,对该系统采用极点配置法可以获得渐近稳定的控制率。由 $\text{rank}(\mathbf{B}\mathbf{A}\mathbf{B}) = 2$ 可知,系统完全可控,可对其进行极点配置。在 s 平面上选择一组合理的、具有期望性能品质指标的极点 $-3 \pm 2j$ 为该闭环系统的极点。反馈控制率为

$$u = -KX \quad (15)$$

$$\text{其中 } K = [k_1 \quad k_2] \quad (16)$$

利用极点配置法可得 $\frac{k_1}{k_2} \approx 2.16$ 。

一般实际情况下, $\theta \neq \frac{\pi}{2}$, 结合式(14)可得

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dy}{dt} \right) = \frac{d(v \cos \beta \sin \theta)}{dt} = \frac{v^2 \cos^2 \beta \cos \theta [\tan \delta (1 - c(x)y) + lc(x) \cos \theta]}{l(1 - c(x)y)} \quad (17)$$

将式(14)、(17)代入式(15)得

$$\frac{v^2 \cos^2 \beta \cos \theta [\tan \delta (1 - c(x)y) + lc(x) \cos \theta]}{l(1 - c(x)y)} + k_1 y + k_2 v \cos \beta \sin \theta = 0 \quad (18)$$

由式(18)可得

$$\delta = \arctan \left(\frac{-l(k_1 y + k_2 v \cos \beta \sin \theta)}{v^2 \cos^2 \beta \cos \theta} - \frac{lc(x) \cos \theta}{1 - c(x)y} \right) \quad (19)$$

参数 k_1 和 k_2 的影响因素主要有3方面:极点配置得到的比值、车辆转向机构的性能和农机作业环境。在确定参数 k_1 和 k_2 的比值后,根据农机作业时的实际工作环境对具体取值进行适当调整。

3 实车实验

3.1 实验平台

实验平台为配有自动驾驶控制系统的拖拉机,前轮转向,后轮驱动,如图3所示。



图3 拖拉机实验平台

Fig. 3 Tractor experiment platform

实验平台上的自动驾驶控制系统采用分布式控制策略,由位置检测单元、航向检测单元、导航控制器和转向控制单元4部分组成,各部分之间通过CAN总线进行通信。其中,位置检测单元由GPS和智能节点组成,GPS实时采集车辆的位置信息,采样频率为20 Hz,定位精度为 (0.01 ± 10^{-12}) m。航向检测单元由惯导MTI和智能节点组成,MTI实时采集车辆的航向信息,采样频率为20 Hz,测量精度为 $\pm 1^\circ$ 。

3.2 实验设计

车辆行驶速度 $v = 1.0$ m/s。模型控制参数根据极点配置法得到的比例值结合实际情况微调。采用高精度GPS采点并获取车辆当前位置信息,惯导MTI获取车辆航向信息,车辆控制器从CAN总线上获取位置信息和航向信息进行解析。

实验过程:在实验场地选取A、B两点,将A、B两点确定的直线作为车辆跟踪的目标路径,如图4所示,在点A附近启动车辆和控制程序开始预定路径的跟踪,并从CAN总线实时获取车辆当前位置信息和航向信息,当车辆接近点B时,停止数据采集;曲线路径跟踪实验的目标路径是由2条直线和2条曲线组合而成,需在实验场地采集6个点,目标路径如图5所示,实验过程和数据采集过程与直线路径跟踪实验类似。

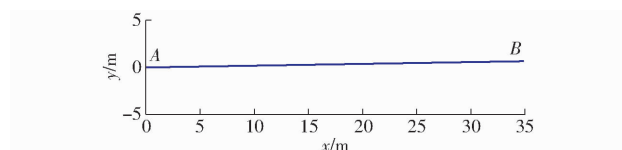


图4 直线设定路径

Fig. 4 Straight line setting path

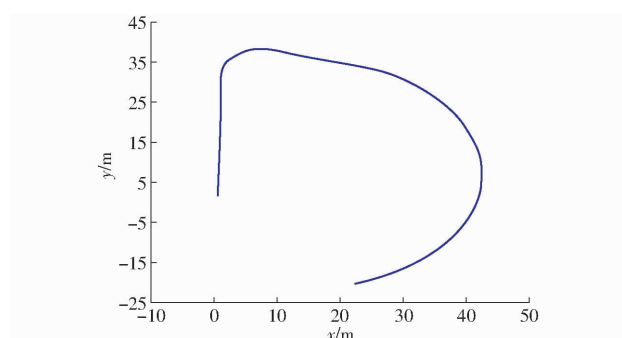


图5 曲线设定路径

Fig. 5 Curve setting path

设计2组对照实验:第1组为基于传统二轮车运动学模型设计的控制方法进行路径跟踪;第2组为基于优化后的运动学模型设计的控制方法进行路径跟踪。车辆从起始点出发时开始从CAN总线上采集数据,接近终点时停止数据采集,对设定路径段内的2组对照实验数据分别进行路径跟踪分析和误差分析,并将2组实验进行对比分析。

3.3 实验结果及分析

采用不同的运动学模型,相同的控制方法(以状态反馈控制方法为例)设计对照实验证明本文提出优化模型的有效性。

3.3.1 直线路径跟踪

第1组实验的直线路径跟踪局部放大情况如图6a所示;第2组实验的直线路径跟踪局部放大情况如图6b所示。

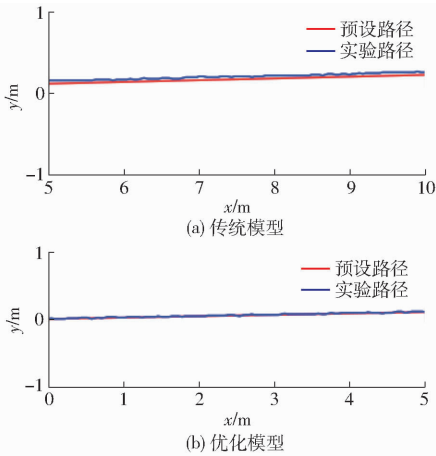


图 6 控制直线路径跟踪

Fig. 6 Control linear path tracking

2 组实验的直线跟踪误差分别如图 7 所示。

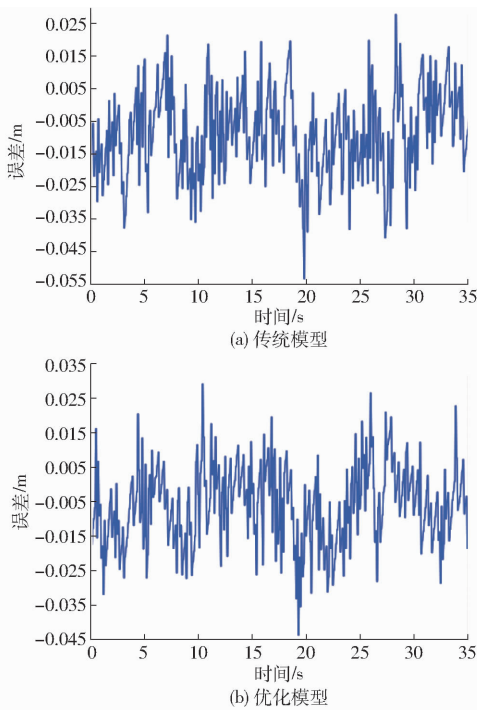


图 7 控制直线路径跟踪误差分析

Fig. 7 Control linear path tracking error analysis

2 组对照实验的直线路径跟踪实验统计结果如表 1 所示。

表 1 控制直线路径跟踪横向误差统计

Tab. 1 Control statistics of lateral error in linear path tracking m

	序号	最大误差	绝对平均误差	标准差
传统模型	1	-0.053 4	0.013 2	0.013 4
	2	-0.046 1	0.016 5	0.014 2
	3	-0.060 2	0.018 9	0.014 5
	平均值	-0.053 2	0.016 2	0.014 0
优化模型	1	-0.043 4	0.012 3	0.011 3
	2	-0.050 2	0.017 1	0.012 8
	3	-0.042 6	0.015 3	0.011 8
	平均值	-0.045 4	0.014 9	0.011 9

由图 7 和表 1 可知,基于优化后运动学模型设计的控制方法在直线路径跟踪时与基于传统二轮车模型设计的路径跟踪控制方法相比,最大横向误差、绝对平均误差以及标准差均有所减小。表明在直线路径跟踪过程中,控制方法中加入侧偏角可以在一定程度上提高控制方法的精度和稳定性。

直线行驶状态下,当航向偏差角和横向偏差较小时,侧偏角近似为 0,对控制器的影响很小;当航向偏差或横向偏差较大时,侧偏角增大,可提高控制器的收敛速度,对控制器有一定的影响。

3.3.2 曲线路径跟踪

第 1 组实验未考虑农机侧偏角,曲线路径跟踪局部放大情况如图 8a 所示;第 2 组实验在运动学模型建模过程中引入侧偏角 β ,曲线路径跟踪局部放大情况如图 8b 所示。

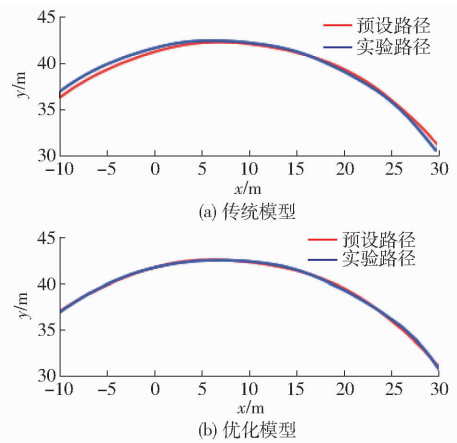


图 8 控制曲线路径跟踪

Fig. 8 Control curve path tracking

2 组实验的曲线跟踪误差如图 9 所示。对曲线路径的跟踪实验统计结果如表 2 所示。

由图 9 和表 2 可知,优化模型控制的曲线路径跟踪横向误差与传统模型控制相比,绝对平均误差减少 0.022 9 m,标准差减少 0.033 6 m,两者均有大幅降低。表明在农机运动学模型建模过程中加入侧偏角对路径跟踪控制方法的控制精度有很大提高,会提高控制方法的控制性能。

曲线行驶状态下,传统二轮车运动学模型只考虑了航向偏差和横向偏差,采用了小角度近似替代;优化后的模型将侧偏角引入运动学模型,提高车辆建模精度,曲线行驶过程中侧偏角对车辆航向角的影响较大,可有效提高控制器的收敛速度。

4 结束语

针对农机运动学模型中的传统二轮车模型只考虑横向误差和航向误差而采用小角度近似替代的问题,本文提出了一种考虑车辆侧偏角的农机运动学

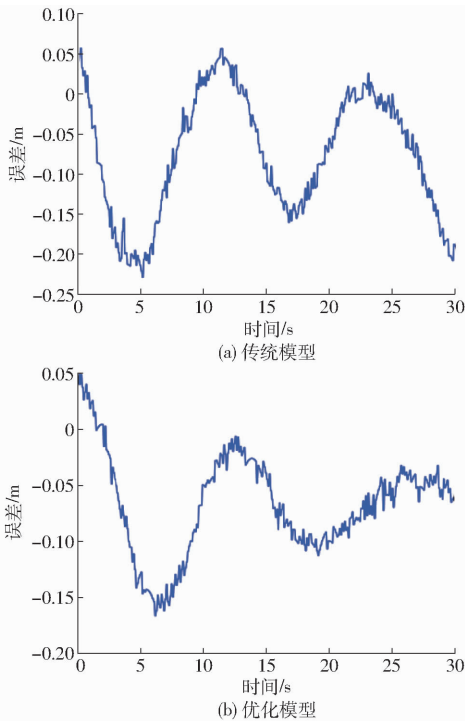


图9 控制曲线路径跟踪误差分析

Fig.9 Error analysis of control curve path tracking

表2 控制曲线路径跟踪横向误差统计

Tab.2 Control curve path tracking lateral error

		statistics			m
		序号	最大误差	绝对平均误差	标准差
传统模型	1	-0.229 6	0.097 9	0.074 2	
	2	-0.196 2	0.064 8	0.076 8	
	3	-0.176 3	0.112 6	0.080 1	
	平均值	-0.200 7	0.091 7	0.077 0	
优化模型	1	-0.167 2	0.070 6	0.043 5	
	2	-0.154 3	0.067 2	0.042 6	
	3	-0.162 6	0.068 6	0.044 1	
	平均值	-0.161 3	0.068 8	0.043 4	

建模方法,在传统运动学模型的基础上加入侧偏角 β 弱化小角度近似替代带来的误差,有效提高农机运动学模型的建模精度。通过实车道路实验测试结果表明,2组对照实验曲线路径跟踪的绝对平均横向误差分别为0.0917、0.0688m,标准差分别为0.0770、0.0434m,实验结果表明本文提出的农机运动学建模方法对路径跟踪控制方法在曲线路径跟踪时的控制性能有明显提升。

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] 王辉,王桂民,罗锡文,等.基于预瞄追踪模型的农机导航路径跟踪控制方法[J].农业工程学报,2019,35(4):11-19.
WANG Hui,WANG Guimin,LUO Xiwen,et al. Path tracking control method of agricultural machine navigation based on aiming pursuit model[J]. Transactions of the CSAE,2019,35(4):11-19. (in Chinese)
- [3] 陈军,朱忠祥,鸟巢凉,等.拖拉机沿曲线路径的跟踪控制[J].农业工程学报,2006,22(11):108-111.
CHEN Jun,ZHU Zhongxiang,TORISU Ryo,et al. On-tracking control of tractor running along curved paths[J]. Transactions of the CSAE,2006,22(11):108-111. (in Chinese)
- [4] 黄沛琛,王紫虹.基于纯追踪曲线跟踪模型的车辆自动导航[J].自动化应用,2011(4):23-27.
HUANG Peichen,WANG Zihong. Pure pursuit curve tracking model research for vehicle automatic guidance[J]. Automation Application,2011(4):23-27. (in Chinese)
- [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] 刘兆朋,张智刚,罗锡文,等.雷沃ZP9500高地隙喷雾机的GNSS自动导航作业系统设计[J].农业工程学报,2018,34(1):15-21.
LIU Zhaopeng,ZHANG Zhigang,LUO Xiwen,et al. Design of automatic navigation operation system for Lovol ZP9500 high clearance boom sprayer based on GNSS[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(1):15-21. (in Chinese)
- [7] 张美娜,林相泽,丁永前,等.基于性能指标的农用车路径跟踪控制器设计[J].农业工程学报,2012,28(9):40-46.
ZHANG Meina,LIN Xiangze,DING Yongqian,et al. Design of path following controllers based on performance index for agricultural vehicle[J]. Transactions of the CSAE,2012,28(9):40-46. (in Chinese)
- [8] 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. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.001. (in Chinese)
- [9] LENAIN R, THUILOT 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 International Conference on Robotics and Automation, USA, 2004.
- [10] ZHU Zhongxiang, CHEN Jun, YOSHIDA T, et al. Path tracking control of autonomous agricultural mobile robots[J]. Journal of Zhejiang University—Science A, 2007, 8(10): 1596-1603.

- [11] CARIOU C, CORDESSES L, MARTINET P. Automatic guidance of a farm tractor along curved paths, using a unique CP-DGPS[C]//Intelligent Robots and Systems, Maui, HI, 2001.
- [12] 吕安涛,宋正河,毛恩荣. 拖拉机自动转向最优控制方法的研究[J]. 农业工程学报,2006,22(8):116-119.
LÜ Antao, SONG Zhenghe, MAO Enrong. Optimized control method for tractor automatic steering[J]. Transactions of the CSAE,2006,22(8):116-119. (in Chinese)
- [13] 陈军,鸟巢凉. 拖拉机行驶路线的自动变更研究[J]. 农业工程学报,2005,21(1):83-86.
CHEN Jun, TORISU Ryo. Automatic control of lane change for autonomous tractors[J]. Transactions of the CSAE,2005,21(1):83-86. (in Chinese)
- [14] 李逃昌,胡静涛,高雷,等. 一种与行驶速度无关的农机路径跟踪方法[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(2):59-65.
LI Taochang, HU Jingtao, GAO Lei, et al. Agricultural machine path tracking method irrelevant to travel speeds[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(2):59-65. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140211&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.011. (in Chinese)
- [15] 张智刚,罗锡文,赵祚喜,等. 基于 Kalman 滤波和纯追踪模型的农业机械导航控制[J]. 农业机械学报,2009,40(增刊):6-12.
ZHANG Zhigang, LUO Xiwen, ZHAO Zuoxi, et al. Trajectory tracking control method based on Kalman filter and pure pursuit model for agricultural vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(Supp.):6-12. (in Chinese)
- [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] 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.
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. 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. (in Chinese)
- [18] 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.
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. 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. (in Chinese)
- [19] 刘志杰,王小乐,任志刚,等. 基于虚拟雷达模型的履带拖拉机导航路径跟踪控制算法[J/OL]. 农业机械学报,2021,52(6):376-385.
LIU Zhijie, WANG Xiaole, REN Zhigang, et al. Crawler tractor navigation path tracking control algorithm based on virtual radar model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(6):376-385. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20210640&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.06.040. (in Chinese)
- [20] 张闻宇,王进,张智刚,等. 基于自校准变结构 Kalman 的农机导航 BDS 失锁续航方法[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(3):18-27.
ZHANG Wenyu, WANG Jin, ZHANG Zhigang, et al. Self-calibrating variable structure Kalman filter for tractor navigation during BDS outages[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(3):18-27. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200302&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.002. (in Chinese)
- [21] 黎永键,赵祚喜,黄培奎,等. 基于 DGPS 与双闭环控制的拖拉机自动导航系统[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(2):11-19.
LI Yongjian, ZHAO Zuoxi, HUANG Peikui, et al. Automatic navigation system of tractor based on DGPS and double closed-loop steering control[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(2):11-19. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170202&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.002. (in Chinese)
- [22] KELLY A J. A feedforward control approach to local navigation problem for autonomous vehicles [R]. CMU Robotics Institute Technical Report, 1994.
- [23] 冯雷. 基于 GPS 和传感技术的农用车辆自动导航系统的研究[D]. 杭州:浙江大学,2004.
FENG Lei. Study on navigation system for off-road vehicle guidance based on GPS and sensor technology[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese)
- [24] EATON R, KATUPITIYA H, POTA H, et al. Robust sliding mode control of an agricultural tractor under the influence of slip [C]//Proceedings of 2009 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics,2009:1873-1878.
- [25] BEVLY D M, GERDES J C, PARKINSON B W. A new yaw dynamic model for improved high speed control of a farm tractor [J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2002, 124(4):659-667.