

doi: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.001

# 农机导航自校正模型控制方法研究<sup>\*</sup>

白晓平<sup>1,2</sup> 胡静涛<sup>1,2</sup> 高雷<sup>1,2</sup> 李逃昌<sup>1,2</sup> 刘晓光<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 针对运动学模型中的近似条件对模型控制方法曲线路径跟踪精度的影响, 提出了一种农机导航自校正模型控制方法。该方法采用模型控制方法设计控制律, 并采用模糊控制方法自适应地在线调节模型控制律的控制量。农业机械的路径跟踪实验结果表明, 该方法既保留了模型控制方法在直线路径跟踪方面的优点, 又弥补了模型控制方法在曲线路径跟踪方面的缺陷。当速度为 1.0 m/s 时, 直线路径跟踪最大横向偏差小于 0.064 9 m, 曲线路径跟踪的最大横向偏差小于 0.185 7 m。

**关键词:** 农机导航 模糊控制 模型控制 自校正模型控制

**中图分类号:** TP24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)02-0001-07

## Self-tuning Model Control Method for Farm Machine Navigation

Bai Xiaoping<sup>1,2</sup> Hu Jingtao<sup>1,2</sup> Gao Lei<sup>1,2</sup> Li Taochang<sup>1,2</sup> Liu Xiaoguang<sup>1,2</sup>

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

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to improve the precision of path tracking, a self-tuning model control method for farm machine navigation was presented. The thought of the two-level control was induced to design the navigation controller. As the first level controller, the nonlinear kinematics model and feedback linearization theory were used to design the control law, and counting formula of the system controlling quantity was given. In order to solve the imprecision problem of the nonlinear kinematics and improve the stability of the navigation system, a second level controller was needed. As the second level controller, the fuzzy controller used the fuzzy control method to adjust system control quantity of model controller online and adaptively. The results of the path tracking experiment for the agricultural machine showed that the control method kept the advantages of model controller for tracking the straight and solved the problems of model controller in a curved path tracking. When it ran at the speed of 1.0 m/s, the maximum lateral deviation of straight path tracking was less than 0.064 9 m, the maximum lateral deviation of curved path traced was less than 0.185 7 m.

**Key words:** Farm machine navigation Fuzzy control Model control Self-tuning model control

### 引言

为了提高农机导航控制精度和稳定性, 许多学者对导航控制方法进行了大量研究<sup>[1-9]</sup>。控制方法的研究不仅在传统的 PID 控制方法方面, 模型控制方法<sup>[10-16]</sup>和模糊控制方法<sup>[17-25]</sup>也成为众多学者研

究导航控制方法的重要方向。

由于农机的作业环境比较差, 轮胎与地面作用过程复杂, 建立精确的数学模型比较困难。现有的多种模型控制方法所采用的模型主要基于在一定近似假设条件下建立的运动学模型<sup>[10-16]</sup>。模型控制方法的优点是在可获得精确模型的控制问题中, 控制

收稿日期: 2014-03-12 修回日期: 2014-04-29

<sup>\*</sup> 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2013AA040403)

作者简介: 白晓平, 博士生, 主要从事农机导航控制研究, E-mail: baixiaopin@sia.cn

通讯作者: 胡静涛, 教授, 博士生导师, 主要从事农机精准作业控制技术研究, E-mail: hujingtao@sia.cn

性能比较好;缺点是对模型的精确性要求较高,不精确的数学模型会给模型控制方法的控制品质带来不良影响。由于运动学模型是在一定近似假设条件下推导出来的,忽略这些假设条件直接应用运动学模型控制方法进行农机的导航控制会给控制精度带来一定的影响。

模糊控制作为智能领域中最具有实际意义的一种控制方法,已经在工业控制领域、家用电器自动化领域等多个行业中解决了传统控制方法无法或者难以解决的问题,取得了令人瞩目的成效<sup>[13-15]</sup>。近年来,模糊控制被引入到农机导航控制研究中,取得了一系列的成就<sup>[16-19]</sup>。模糊控制方法的导航控制精度依赖于控制规则,规则设计得不好或者规则条数过少都得不到理想的控制效果<sup>[20]</sup>。但是,模糊控制方法具有不依赖精确数学模型等优点,在解决无法建立精确数学模型的复杂控制系统的控制问题方面起到了重要作用。

为了提高导航控制精度和稳定性,本文从理论推导和实际路面实验两方面详细分析直接采用运动学模型进行导航控制在曲线路径跟踪方面存在的问题。针对曲线路径跟踪方面存在的问题,提出一种自校正模型控制方法。

## 1 农机导航自校正模型控制思想

农机导航自校正模型控制器由模型控制器和自校正控制器两部分组成,如图1所示。

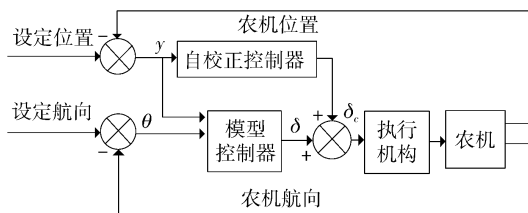


图1 控制框图

Fig. 1 Control diagram

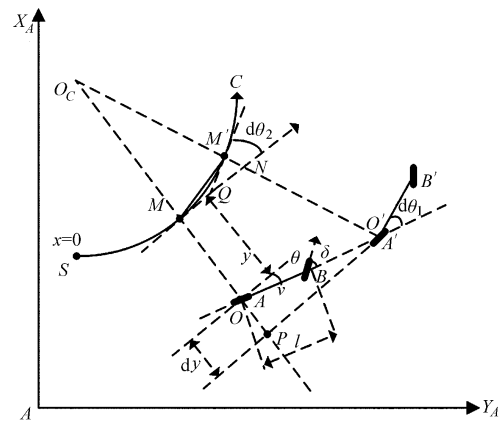
模型控制器作为主控制器,基于非线性运动学模型设计了渐进稳定的控制律,基于当前的位姿信息计算控制量转向轮期望转角 $\delta$ ,并将它输出给执行机构,控制农机按预定轨迹行走。自校正控制器作为辅助控制器,采用模糊控制方法,基于驾驶员经验设计模糊控制规则,校正模型控制器控制量 $\delta$ 。由于模型控制器设计所依赖的运动学模型只是农机运行状态的一种近似反应,模型控制器的控制效果会与预期的控制效果存在一定差异,自校正控制器引入一段时间内横向偏差的变化趋势 $s_{dy}$ 来监视模型控制器的控制效果,并实时计算转向轮期望补偿角 $\delta_c$ 修正模型控制器控制量 $\delta$ 。自校正模型控制思

想既保留了模型控制方法在导航控制中的优势,又减小了不精确模型给导航控制品质带来的不良影响,提高了导航控制精度。

## 2 模型控制器设计

### 2.1 农机运动学模型

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,可将农用拖拉机、联合收获机、插秧机等多种四轮农机简化成二轮车模型进行运动学分析,如图2所示。其中, $M$ 点是曲线路径上距控制点 $O$ 最近的点。



用极点配置的方法 通过状态反馈

$$u = -KX \quad (3)$$

可得到使得系统零点渐进稳定的控制律为

$$\delta = \arctan \left( l \frac{\cos \theta^3}{(1 - c(x)y)^2} \left[ \frac{dc(x)}{dx} y \tan \theta + c(x)(1 - c(x)y) \tan \theta^2 - k_2(1 - c(x)y) \tan \theta - k_1 y \right] + \frac{lc(x) \cos \theta}{1 - c(x)y} \right) \quad (4)$$

其中参数  $k_1$  和  $k_2$  均大于零  $k_1$  与  $k_2$  比值的大小决定了控制系统的稳定性和快速性, 比值越大快速性越好, 稳定性越差。

### 2.3 模型控制方法的控制品质与模型精确性的关系

式(1)所示运动学模型是建立在  $c(x) v \sin \theta dt$  近似等于零和  $dx$  与图2中  $M$ 、 $N$  两点间的距离近似相等两个假设基础上的, 这两个假设是否能严格满足决定了该运动学模型能否准确真实再现农机运动的情况。当跟踪曲线路径的曲率较小时, 该假设条件基本可以得到满足; 但是, 随着曲率的增大, 这两个假设越来越难以得到满足, 模型精确性也就越差。

为了分析模型控制方法控制品质与模型精确性的关系, 本文在系统状态方程中引入扰动项  $W(x)$  来反映曲率变化对状态空间模型的影响, 增加扰动项后系统的状态空间模型为

$$\dot{X} = AX + Bu + W(x) \quad (5)$$

利用  $W(x) = T(x)X$  变换可将扰动项对系统状态的影响反馈到系统状态转移矩阵上, 经过变换后的系统状态空间模型为

$$\dot{X} = (A + T(x))X + Bu \quad (6)$$

其中 
$$T(x) = \begin{bmatrix} t_{11}(x) & t_{12}(x) \\ t_{21}(x) & t_{22}(x) \end{bmatrix}$$

将式(3)代入式(6), 得到系统的特征方程为

$$\begin{cases} S^2 + bS + d = 0 \\ b = k_2 - t_{21}(x) - t_{11}(x) \\ d = t_{11}(x)t_{22}(x) - t_{12}(x)t_{21}(x) - k_2 t_{11}(x) + k_1 t_{12}(x) - k_1 t_{21}(x) + k_1 \end{cases} \quad (7)$$

参数  $b$ 、 $d$  反映了扰动项对系统闭环极点的影响。令系统的闭环极点  $S = [s_1 \ s_2]$  则使得闭环系统稳定的参数  $b$ 、 $d$  应满足的条件为

$$\begin{cases} s_1 + s_2 = -b < 0 \\ s_1 s_2 = d > 0 \end{cases} \quad (8)$$

当系统的扰动使得上述条件中任何一个条件不满足时, 系统则会发散。

## 3 自校正控制器设计

模型控制器在直线路径和小曲率路径跟踪过程

中跟踪效果较好, 而在较大曲率路径跟踪过程中跟踪效果会与期望的跟踪效果存在较大差异。因此, 可以通过监测模型控制器控制效果与预期控制效果的吻合度来评价模型控制器的控制效果。为此, 引入最近一段时间  $\Delta t$  内偏差变化趋势变量  $sdy$  作为吻合度参数。

$$sdy = \frac{\int_{t-\Delta t}^t dy}{\Delta t} = \frac{y_t - y_{t-\Delta t}}{\Delta t} \quad (9)$$

式中  $y_t$ —— $t$  时刻的横向偏差值

$y_{t-\Delta t}$ —— $t - \Delta t$  时刻的横向偏差值

$\Delta t$  需要通过经验来选取, 如果  $\Delta t$  的取值非常小, 自校正控制器的反应速度很快, 但是系统的稳定性会比较差; 如果  $\Delta t$  的取值比较大, 自校正控制器的反应速度相对会慢一些, 但是系统的稳定性会比较好。经过反复实验, 参数  $\Delta t$  选为 1.2 s。

### 3.1 输入输出变量的模糊化

自校正控制器有 2 个输入变量, 横向偏差变量  $y$  和变化趋势变量  $sdy$ 。输出变量是转向轮期望补偿角  $\delta_c$ 。

模糊化过程主要实现用数字表示的输入量转化为通常用语言值表示的某一模糊化等级的序数。

(1) 横向偏差  $y$

基本论域  $[-60, 60]$ ; 量化等级:  $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ; 量化因子  $K_y = 6/60 = 0.1$ 。

(2) 变化趋势变量  $sdy$

基本论域  $[-6, 6]$ ; 量化等级:  $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ; 量化因子  $K_y = 6/6 = 1$ 。

(3) 转向轮期望补偿角  $\delta_c$

基本论域  $[-8, 8]$ ; 量化等级:  $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ; 量化因子  $K_y = 6/8 = 0.75$ 。

横向偏差  $y$ 、横向偏差变化趋势  $sdy$  和转向轮期望补偿角  $\delta_c$  3 个变量的模糊等级均为: 负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB)。3 个隶属度函数均采用高斯函数, 横向偏差的隶属度如图3所示。

### 3.2 控制规则库设计

根据驾驶员的实际驾车经验, 自校正控制器的设计原则为: 偏差绝对值较大时, 控制量尽量减小偏差; 偏差绝对值较小时, 除了要考虑减小偏差外, 还应该考虑系统稳定性问题。如果偏差绝对值的变化趋势为增大, 自校正控制器应该输出转向轮期望补偿角校正模型控制器输出, 使得农机向偏差减小的

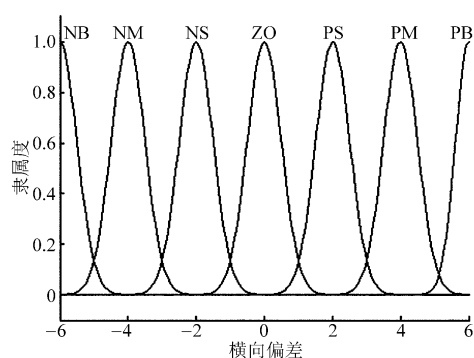


图3 横向偏差的隶属度函数

Fig. 3 Image of membership function of lateral deviation

方向运动;如果偏差绝对值的变化趋势为减小,表明此刻的控制效果与期望控制效果基本吻合,自校正控制器输出的控制量应该小角度调节或者不调节模型控制器输出。

如图4所示,车体在导航线的右侧,横向偏差为负的最大,且有继续向负向增大的趋势。显然,这与期望的模型控制器控制效果不相符,自校正控制器应该输出正的最大转向角期望补偿角校正转向角期望转角,使车体向导航线方向行驶。规则描述为:if  $y = \text{NB}$  and  $\text{sd}y = \text{NB}$ , then  $\delta_e = \text{PB}$ 。如此可以得到49条模糊控制规则,如表1所示。

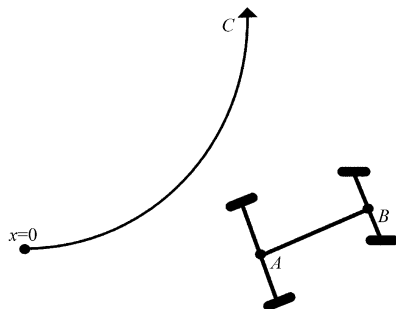


图4 车体与导航线位置关系

Fig. 4 Position relation between vehicle and navigation line

表1 模糊控制规则

Tab.1 Fuzzy control regulation

| 横向偏差 $y$ | 横向偏差变化趋势 $\text{sd}y$ |    |    |    |    |    |    |
|----------|-----------------------|----|----|----|----|----|----|
|          | NB                    | NM | NS | ZO | PS | PM | PB |
| NB       | PB                    | PB | PB | PM | PS | ZO | ZO |
| NM       | PB                    | PB | PM | PS | ZO | ZO | NS |
| NS       | PM                    | PM | PS | PS | ZO | NS | NM |
| ZO       | PM                    | PS | PS | ZO | NS | NS | NM |
| PS       | PM                    | PS | ZO | NS | NS | NM | NM |
| PM       | PS                    | ZO | ZO | NS | NM | NB | NB |
| PB       | ZO                    | ZO | NS | NM | NB | NB | NB |

## 4 实车实验

### 4.1 实验平台

为了对所提出的方法进行实车验证,采用洋马VP6型插秧机为实验农机,如图5所示,将自主研发

的分布式自动导航控制系统安装在插秧机上,构成本次实验的实验平台。



图5 插秧机实验平台

Fig. 5 Experimental platform

分布式自动导航控制系统结构如图6所示。其中,位置检测单元由GPS和智能节点组成,GPS实时采集插秧机的位置信息,采样频率为5 Hz,定位精度为2 cm。航向检测单元由MTI和智能节点组成,MTI实时采集插秧机航向信息,采样频率为100 Hz,测量精度为1°。转向角检测单元由转角编码器及连杆机构组成,检测精度为1°。

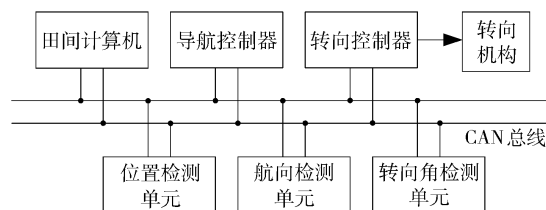


图6 分布式自动导航控制系统

Fig. 6 Distributed navigation system

### 4.2 实验设计

实验中,插秧机行驶速度  $v = 1.0 \text{ m/s}$ ,模型控制器参数  $[k_1 \ k_2] = [0.09 \ 0.6]$ ,农机初始位置选为设定轨迹的初始点,初始航向选为设定轨迹初始点的切线方向。

农机一般按照直线路径进行田间作业,而在到达地头区域时,需要切换到曲线路径进行转弯操作,转弯结束后继续切换到直线路径进行作业。根据以上农机作业需求,选取图7所示的直线和图8所示的由3条直线和2段圆弧交替切换的曲线作为设定路径,分别采用自校正模型控制方法和模型控制方法进行设定路径的跟踪实验,并使用高精度GPS记录实验数据。

### 4.3 实验结果及分析

#### 4.3.1 直线路径跟踪

模型控制方法和自校正模型控制方法对直线设定路径的跟踪效果分别如图9、图10所示。

模型控制方法和自校正模型控制方法的直线路

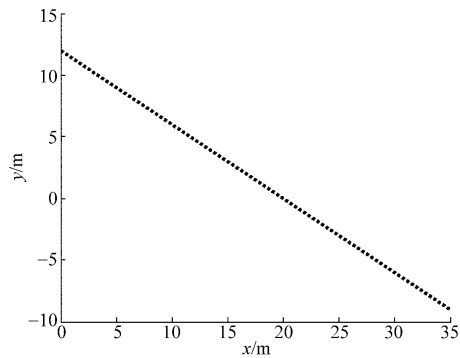


图 7 直线设定路径

Fig. 7 Predefined straight line route

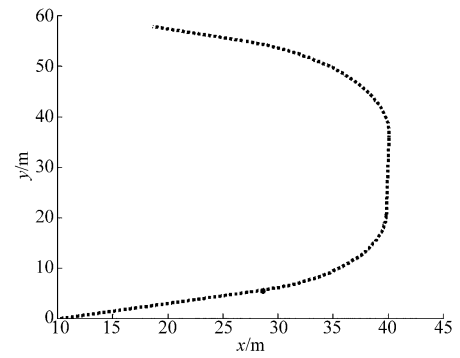


图 8 曲线设定路径

Fig. 8 Predefined curve route

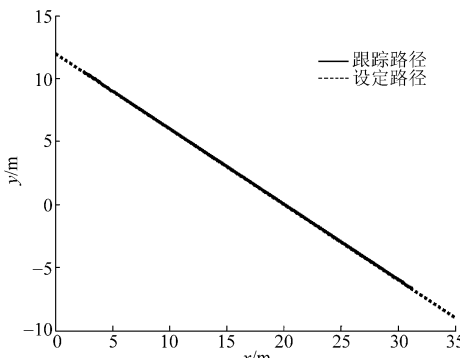


图 9 模型控制方法直线路径跟踪轨迹

Fig. 9 Tracking curve of straight line path for model control method

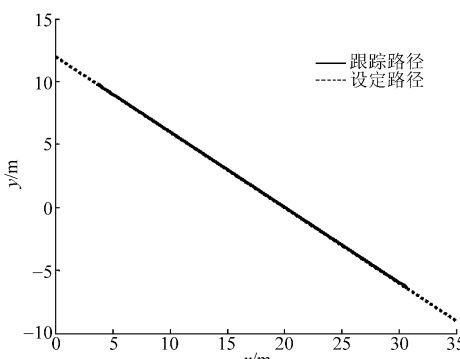


图 10 自校正模型控制方法直线路径跟踪轨迹

Fig. 10 Tracking curve of straight line path for self-tuning model control method

径跟踪实验结果分别如表 2、表 3 所示。

对比实验结果,自校正模型控制方法的绝对值平均偏差、标准差及最大偏差均与模型控制方法基本相同,表明自校正模型控制方法保留了模型控制方法在直线路径跟踪方面的优点,直线路径跟踪最大偏差小于 7 cm。

4.3.2 曲线路径跟踪

采用模型控制方法进行预定曲线路径跟踪实验 3 次实验均发现在第 1 段圆弧路径跟踪过程中,出现了发散现象,如图 11 所示。

表 2 模型控制方法横向跟踪误差统计结果

Tab. 2 Statistical result of lateral tracking error

| for model control method |         |         |         | m |
|--------------------------|---------|---------|---------|---|
| 实验序号                     | 最大偏差    | 绝对值平均偏差 | 标准差     |   |
| 1                        | 0.051 8 | 0.028 4 | 0.020 0 |   |
| 2                        | 0.064 4 | 0.037 7 | 0.012 2 |   |
| 3                        | 0.056 6 | 0.039 8 | 0.040 4 |   |
| 4                        | 0.056 3 | 0.030 7 | 0.019 1 |   |
| 5                        | 0.050 1 | 0.027 6 | 0.016 0 |   |
| 平均值                      | 0.055 8 | 0.032 8 | 0.021 5 |   |

表 3 自校正模型控制方法横向跟踪误差统计结果

Tab. 3 Statistical result of lateral tracking error for

| self-tuning model control |         |         |         | m |
|---------------------------|---------|---------|---------|---|
| 实验序号                      | 最大偏差    | 绝对值平均偏差 | 标准差     |   |
| 1                         | 0.059 4 | 0.025 8 | 0.022 8 |   |
| 2                         | 0.062 4 | 0.025 3 | 0.021 9 |   |
| 3                         | 0.063 0 | 0.023 5 | 0.028 4 |   |
| 4                         | 0.064 9 | 0.020 5 | 0.018 4 |   |
| 5                         | 0.059 7 | 0.023 3 | 0.019 7 |   |
| 平均值                       | 0.061 9 | 0.023 7 | 0.022 2 |   |

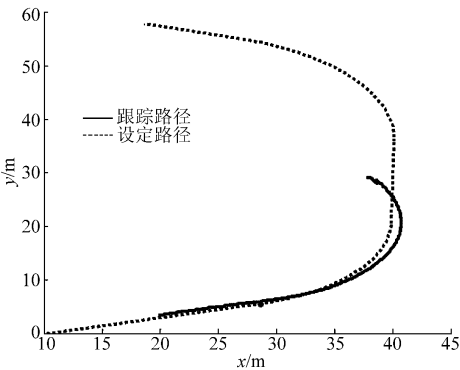


图 11 模型控制方法曲线路径跟踪轨迹

Fig. 11 Tracking curve of curve path for model control method

发散原因分析:随着曲率的增大,模型精确性降低。主要原因有 2 个:①  $c(x) \sin \theta dt$  的值为  $0.14 \sin \theta$ ,当曲率较大时航向变化快,  $\theta$  值一般较大,忽略该值会对模型的精确性造成很大的影响。②  $dx$  与  $M、N$  两点距离的近似程度随着曲率的增大而降

低。由2.3节的分析可知,模型的精确性降低会引起系统的扰动增大,当扰动使得式(8)中的任何一个条件不满足时,系统不再稳定,会出现发散现象。经过反复实验,测得当曲率大于0.07时系统开始发散。

采用自校正模型控制方法,进行同一段曲线路径的跟踪实验,跟踪效果如图12所示,实验结果如表4所示。

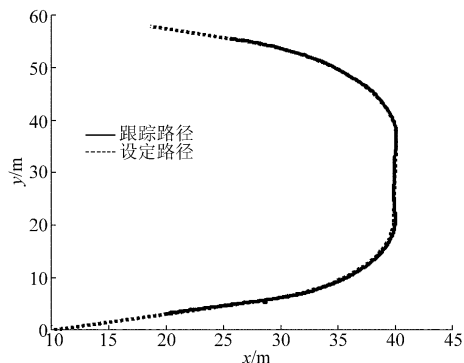


图12 自校正模型控制曲线路径跟踪轨迹

Fig. 12 Tracking curve of curve path for self-tuning model control

对比曲线路径实验结果,单纯使用模型控制方法在曲线路径跟踪时存在比较大的弱点,当曲线路径的曲率比较大时,控制效果明显变差,甚至出现发散现象。而自校正控制方法改善了模型控制方法在曲线路径跟踪方面的缺陷,提高了模型控制方法在

表4 自校正模型控制方法曲线路径跟踪横向跟踪误差统计结果

Tab. 4 Lateral tracking error statistical result for self-tuning model control

| 实验序号 | 最大偏差    | 绝对值平均偏差 | 标准差     |
|------|---------|---------|---------|
| 1    | 0.185 7 | 0.102 1 | 0.077 8 |
| 2    | 0.165 1 | 0.069 3 | 0.078 0 |
| 3    | 0.172 0 | 0.089 8 | 0.077 9 |
| 平均值  | 0.174 3 | 0.087 1 | 0.077 9 |

曲线路径跟踪方面的控制精度和稳定性。

## 5 结束语

提出了一种自校正模型控制方法,以模型控制器作为主控制器,自校正控制器作为辅助控制器。主控制器采用渐进稳定的控制律计算控制量,控制农机按预定路径行走,自校正控制器实时监视模型控制方法的控制效果,根据驾驶员经验自动调整模型控制方法的控制量输出,既保留了模型控制方法在直线路径跟踪方面的优点,又改善了模型控制方法在曲线路径跟踪方面的控制效果。实验结果表明,本文提出的控制方法可用于直线路径和曲线路径的跟踪控制,提高了农机导航控制系统的控制精度和稳定性。直线路径跟踪最大横向偏差小于0.064 9 m,曲线路径跟踪的最大横向偏差小于0.185 7 m。

## 参考文献

- 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)
- 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)
- 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)
- 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(Sup.): 6-12. (in Chinese)
- 金立生,王荣本,纪寿文,等. 智能车辆自主导航神经网络控制器设计[J]. 农业机械学报, 2005, 36(10): 30-33.  
Jin Lisheng, Wang Rongben, Ji Shouwen, et al. Neural network controller design for autonomous navigation of intelligent vehicle based on vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(10): 30-33. (in Chinese)
- 陈军,朱忠祥,鸟巢谅,等. 基于神经网络的农用车自动跟踪控制[J]. 农业机械学报, 2007, 38(5): 131-133.  
Chen Jun, Zhu Zhongxiang, Torisu R, et al. Automatic on-tracking control of farm vehicle based on neural network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(5): 131-133. (in Chinese)
- 姬长英,周俊. 农业机械导航技术发展分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 44-54.  
Ji Changying, Zhou Jun. Current situation of navigation technologies for agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 44-54. (in Chinese)
- 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. Compensation model for measurement error of wheel turning angle in agricultural guidance [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery , 2014 , 45( 8) : 33 – 37. ( in Chinese)
- 9 郭娜 , 胡静涛 , 王鹤. 基于 GPS 导航的插秧机作业控制系统 [J]. 农业机械学报 , 2013 , 44( 1) : 200 – 204.  
Guo Na , Hu Jingtao , Wang He. Intelligent operation control system for rice transplanter based on GPS navigation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery , 2013 , 44( 1) : 200 – 204. ( in Chinese)
- 10 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)
- 11 陈军 , 鸟巢谅 , 朱忠祥 , 等. 拖拉机在牧草地上自动引导行走的控制 [J]. 农业机械学报 , 2005 , 36( 7) : 104 – 107.  
Chen Jun , Torisu R , Zhu Zhongxiang , et al. Study on automatic guidance for tractor on grassland [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery , 2005 , 36( 7) : 104 – 107. ( in Chinese)
- 12 陈军 , 鸟巢谅. 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 R. Automatic control of lane change for autonomous tractors [J]. Transactions of the CSAE , 2005 , 21( 1) : 83 – 86. ( in Chinese)
- 13 陈军 , 鸟巢谅 , 朱忠祥 , 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 , Torisu R , Zhu Zhongxiang , et al. On-tracking control of tractor running along curved paths [J]. Transactions of the CSAE , 2006 , 22( 11) : 108 – 111. ( in Chinese)
- 14 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 the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation , 2004 , 5: 4381 – 4386.
- 15 Cariou C , Cordesses L , Martinet P. Automatic guidance of a farm tractor along curved paths , using a unique CP-DGPS [C] // Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems , 2001 , 2: 674 – 679.
- 16 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery , 2014 , 45( 2) : 59 – 65. ( in Chinese)
- 17 姜杉 , 冯文浩 , 杨志永 , 等. 基于模糊 PID 调节的核磁共振兼容机器人气动控制技术 [J]. 机器人 , 2012 , 34( 5) : 531 – 538.  
Jiang Shan , Feng Wenhao , Yang Zhiyong , et al. Pneumatic control technology based on fuzzy PID for MRI compatible robots [J]. Robot , 2012 , 34( 5) : 531 – 538. ( in Chinese)
- 18 顾星 , 钟鸣 , 姚玉峰. 基于模糊自适应 PID 的加样臂位置控制 [J]. 工程设计学报 , 2012 , 19( 5) : 385 – 390.  
Gu Xing , Zhong Ming , Yao Yufeng , et al. Position control for sampling arm based on self-adapting fuzzy-PID [J]. Journal of Engineering Design , 2012 , 19( 5) : 385 – 390. ( in Chinese)
- 19 徐逢秋 , 许贤泽 , 乐意 , 等. 基于模糊控制的快速自动安平激光扫描仪 [J]. 光学精密工程 , 2012 , 20( 8) : 1870 – 1876.  
Xu Fengqiu , Xu Xianze , Le Yi , et al. Fast automatic rotating laser construction based on fuzzy control [J]. Optics and Precision Engineering , 2012 , 20( 8) : 1870 – 1876. ( in Chinese)
- 20 周建军 , 张曼 , 汪懋华 , 等. 基于模糊控制的农用车辆路线跟踪 [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)
- 21 郭伟斌 , 陈勇. 基于模糊控制的除草机器人自主导航 [J]. 机器人 , 2010 , 32( 2) : 204 – 209.  
Guo Weibin , Chen Yong. Fuzzy control based autonomous navigation for a weeding robot [J]. Robot , 2010 , 32( 2) : 204 – 209. ( in Chinese)
- 22 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)
- 23 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)
- 24 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery , 2013 , 44( 1) : 205 – 210. ( in Chinese)
- 25 应浩. 关于模糊控制理论与应用的若干问题 [J]. 自动化学报 , 2001 , 27( 4) : 591 – 593.  
Ying Hao. Some issues in fuzzy control theory and applications [J]. Acta Automatica Sinica , 2001 , 27( 4) : 591 – 593. ( in Chinese)