

插秧机导航路径跟踪改进纯追踪算法

李 革¹ 王 宇¹ 郭刘粉¹ 童俊华^{1,2} 何 勇³

(1. 浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018; 2. 浙江省种植装备技术重点实验室, 杭州 310018;
3. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058)

摘要: 插秧机田间行驶路径包括直线作业段和地头曲线转弯段,因此需要对传统的纯追踪算法进行改进,使其满足曲线路径跟踪。以约翰迪尔 Starfire3000 型接收机、GS2630 型显示器和 ATU200 型电动方向盘为主要硬件设备,针对给定的曲线路径,提出了一种路径跟踪控制算法,并通过模型仿真和田间试验相结合的方法,对该导航控制算法进行了验证分析。该导航控制算法首先根据车辆速度和路径弯曲程度来动态调整前视距离,其次在利用预见控制求得车辆目标点的基础上,利用改进的纯追踪算法设计控制器,最后按照插秧机作业时的路径进行仿真和试验。试验结果表明,车辆以 1 m/s 的速度行驶且在转弯半径为 0.9 m 时,最大跟踪误差可控制在 0.159 m 以内。

关键词: 插秧机; 路径跟踪; 纯追踪算法; 前视距离

中图分类号: TP29 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)05-0021-06

Improved Pure Pursuit Algorithm for Rice Transplanter Path Tracking

LI Ge¹ WANG Yu¹ GUO Liufen¹ TONG Junhua^{1,2} HE Yong³

(1. Faculty of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China
2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology, Hangzhou 310018, China
3. College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: There are a lot of algorithms on the pure pursuit model, but most of them focus on the linear path tracking. Due to the path of the transplanter including straight line and curve turning segment, it is necessary to improve the traditional pure tracking algorithm. Taking John Deere Starfire3000 receiver, GS2630 display and ATU200 as the main hardware equipments, according to the curve of a given path, a path tracking control algorithm was proposed, combining the model simulation and field test, the navigation control algorithm was verified. The specific steps of the navigation control algorithm were as follows: firstly, according to the vehicle speed and the bending degree of the road, the lookahead distance was adjusted dynamically. Secondly, on the basis of using the preview control to get the vehicle target, controller was designed based on improved pure tracking algorithm. At last, the simulation and experiment were carried out according to the path of transplanter. The results showed that the maximum error could be controlled within 0.159 m when the vehicle was traveling at the speed of 1 m/s and the turning radius was 0.9 m.

Key words: rice transplanter; path tracking; pure pursuit algorithm; lookahead distance

0 引言

随着智能农业机械的不断发展,自动导航技术成为研究农业领域的主要热点之一^[1]。而导航控制技术中的重点和难点是路径跟踪,路径跟踪的效

果直接决定导航控制的优劣。因此,开展农业机械导航路径跟踪控制算法的研究对于智能农业机械的设计和开发有着重要的意义^[2-5]。

国内外学者对导航控制算法做了许多的研究。NAGASAKAN 等^[6]在地头以转弯半径为固定值的前

收稿日期: 2017-10-31 修回日期: 2017-11-29
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700401)、国家自然科学基金项目(51375459)、国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2012AA10A504)、现代农业产业技术体系项目(111329A4C12352)和杭州市科技发展计划项目(20170432B27)
作者简介: 李革(1958—),男,教授,主要从事现代农业装备与技术研究,E-mail: Lige0717g@163.com

提下,根据航向偏差来控制决策插秧机进行路径跟踪,该方法虽然实现了地头转向,但在与直线跟踪衔接处出现了较大的超调量。KISE 等^[7]利用三次样条函数进行基于最小转弯半径和最大摆角速率的转向路径规划,设计了两种地头转弯控制方法,尽管仿真结果表明在路径跟踪过程中的最大跟踪误差小于 0.2 m,但该方法采用三次样条函数对曲线路径进行规划,因此,要实现转向必须对曲线路径进行跟踪,控制难度相对较大。罗锡文等^[8]把拖拉机的运动模型看作是简化的二轮车运动模型,设计了直线跟踪导航 PID 控制器,控制器参数是通过对该系统进行时域阶跃响应仿真分析和田间试验效果综合整定的,不适应曲线路径跟踪。黄沛琛等^[9]采用 BP 神经网络实现动态调整前视距离,提出了一种改进纯追踪模型的农业机械地头转向控制方法,该方法采用神经网络控制,需要大量的高质量训练成本,若仅对有限的农业车辆起始位姿样本进行训练,则具有局限性。李逃昌等^[10]提出的模糊自适应纯追踪模型的农业机械路径跟踪方法的模糊控制规则是根据专家经验制定的,其跟踪误差大,很难快速修正。

本文以井关插秧机为研究平台,以约翰迪尔 Starfire3000 型接收机、GS2630 型显示器和 ATU200 型电动方向盘为主要硬件设备,设计基于 GPS 技术的改进纯追踪模型的插秧机导航路径跟踪控制算法。通过模型仿真和田间试验相结合的方法,对该导航控制算法进行验证分析。

1 车辆运动学模型

农业车辆为井关 PZ60 型插秧机,4 轮驱动,全长 2.96 m,发动机总功率 8.3 kW,前轮液压助力转向,无级变速,前轮外径 0.6 m,后轮外径 0.9 m,轴距 1.2 m。

该车辆模型采用 KELLY 提出的简化二轮车运动学模型^[11]。在 WGS-84 的高斯投影平面坐标系下对该简化模型进行运动学分析。如图 1 所示,δ 为前轮转角,以车辆纵向为基准,偏右为正,偏左为负。θ 为车辆航向角,即车辆的纵向逆时针旋转到 y 轴的夹角,取值范围为 0°~360°。L 为车辆前后两

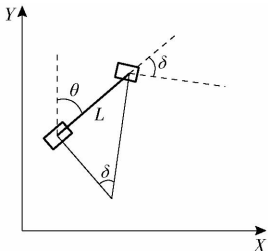


图 1 车辆运动学模型
Fig. 1 Vehicle kinematics model

轴间距,对该模型进行运动学分析可得

$$\begin{aligned}x'(t) &= v \sin \theta \\y'(t) &= v \cos \theta \\\theta'(t) &= \frac{v \tan \delta}{L}\end{aligned}$$

式中 v ——车辆纵向速度
 $x'(t)$ ——车辆在 x 轴方向分速度
 $y'(t)$ ——车辆在 y 轴方向分速度
 $\theta'(t)$ ——车辆角速度

2 导航控制方法设计

2.1 前视距离的动态调整

前视距离是模仿人工驾驶车辆时向前观察的距离,研究表明该距离与车辆速度以及前面路径弯曲程度有关^[12-14]。速度越大前视距离越大,弯度越大则前视距离越小,由此可设前视距离为

$$l = l_p + k_1 v + k_2 \Omega$$

式中 l_p ——前视距离的基值
 k_1 ——速度系数,数值为正
 k_2 ——弯度系数,数值为负
 Ω ——弯度

首先确定预定义路径,将该路径以二维数组的形式存储起来,可表示为 $(x(n), y(n))$ 。当前车辆的 GPS 定位点 P_r 坐标为 (x, y) ,求取预定义路径上与车辆当前位置最近的点的方法是通过计算预定义路径上的每个点与当前车辆坐标点的距离,距离最小的那个点即为车辆当前位置与预定义路径的最近点 P_k 坐标为 (x_k, y_k) ,由该最近点向后每隔 i 个点取 1 个点,再取 3 个点,由此可得到 4 个点,分别为 P_k, P_{k+i}, P_{k+2i} 和 P_{k+3i} ,其中 i 为正整数,取值根据前向预测距离而定,如图 2 所示。用直线依次连接这 4 个点,Ω 表示前面路径的弯度,很显然前面路径越弯曲,Ω 越大。由此可以达到动态调整前视距离的目的。最后根据前视距离可得到车辆的目标点。

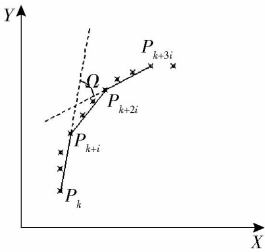


图 2 确定弯度的方法
Fig. 2 Method of determining camber

2.2 导航偏差的设定

导航偏差分为横向偏差和航向偏差,横向偏差为车辆当前位置距预定义路径最近的垂直距离,以车辆在路径的右边为正,左边为负,该距离可以评价

导航效果。航向偏差是车辆当前航向与目标航向的夹角,以车辆当前航向相对于目标航向右偏为正,左偏为负,将该值作为路径跟踪控制算法的输入量。如图 3 所示, P_r 点为当前车辆的位置,以车辆后轴中心点为控制点, A 点为在车辆纵向方向上截取适当前视距离所得到的点, P_{k+j} 是预定义路径上距 A 点最近的点,也就是目标点,则向量 P_rP_{k+j} 为目标方向, ϕ 为航偏角, d 为横向偏差。

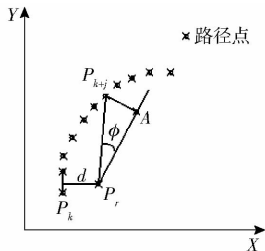


图 3 偏差的确定方法
Fig. 3 Method of determining deviations

2.3 路径跟踪控制算法的设计

在大量的理论和试验研究的基础上,设计了一种简单有效的路径跟踪控制算法,其基本原理是利用上述得出的航向偏差作为控制器的输入量,建立控制算法的几何模型,理论推导出前轮的转角公式,将前轮转角作为控制器的输出量,另外由于横向偏差是衡量导航效果优劣的量,因此将横向偏差作为观测调节量,当横向偏差过大时,给输出量一个补偿值,使横向偏差快速减小。

具体算法是将预定义路径以二维数组的形式存储于车载工控机(GS2630 型显示器)中,由车载 GPS 接收机实时接收卫星定位信号和基站的差分定位信号,由此可解算出插秧机当前的位置坐标,工控机将该位置坐标与预定义路径数组信息进行比较,通过计算得出距离当前车辆定位点最近的预定义路径上的点,即能够得出横向偏差,再通过上述方法得出合适的前视距离,由前视距离来获得路径跟踪的目标点,从而确定目标方向,将该信息与电子罗盘采集到的当前航向信息进行对比能够得出航向偏差,将航向偏差作为输入量输入路径跟踪算法控制器中,同时将横向偏差作为观测量,最后输出前轮转角。该输出值作为下位机的输入量,计算后得出步进电动机的转角,由步进电动机带动方向盘转动,进而带动转向机构转动,从而达到预计的前轮转角。

如图 4 所示, P_r 为当前车辆的位置点, P_{k+j} 为目标点, R 为转弯半径, C 为圆心点, ϕ 为航偏角,则在直角三角形 BP_rC 中可得

$$\tan \delta = \frac{L}{R} \tag{1}$$

由于 ϕ 为圆 C 的弦切角,因此可得

$$\angle P_rCP_{k+j} = 2\phi \tag{2}$$

在等腰三角形 P_rCP_{k+j} 中,由正弦定理可得

$$\sin \phi = \frac{l_{P_rP_{k+j}}}{2R} \tag{3}$$

式中 $l_{P_rP_{k+j}}$ ——点 P_r 与点 P_{k+j} 间的距离

由式(1)~(3)可得

$$\delta = \arctan \frac{2L \sin \phi}{l_{P_rP_{k+j}}} \tag{4}$$

从式(4)可以看出,由输入量 ϕ 即可求得前轮转角。该角度求出后输入到下位机中,转换成指令,由转向系统完成转向动作,从而实现路径跟踪。另外,式(4)是从几何角度分析得出的,理论上证明可行,但该式不包含横向偏差,因此需要将其进行改进。在设计控制器时^[15-19],将横向偏差作为观测量进行实时监测,如果横向偏差过大,即当横向偏差 $d \geq d_r$ 时,则将前轮转角 δ 乘以一个系数 k_{dr} ($k_{dr} > 0$),由此可以增大前轮转角,使其快速到达目标点,通过仿真和试验得出:当 $d_r = 0.02$ 、 $k_{dr} = 1.08$ 时,导航效果最佳。这样就能够使车辆快速减小横向误差,提高导航效果,由于该方法在推导中并未对预定义路径提出要求,因此这种算法既可实现直线路径跟踪,也可实现曲线路径跟踪,适应性较强。

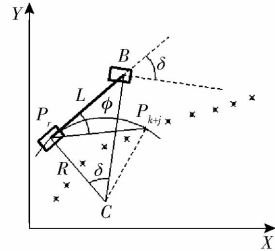


图 4 改进纯追踪算法模型
Fig. 4 Improved pure tracking algorithm model

3 仿真

在 Matlab/Simulink 环境下,以两轮车运动学模型为控制对象,对上述路径跟踪控制方法建立仿真模型^[20],由于两轮车运动模型是在理想的条件下建立的,即不考虑侧滑因素,因此需要加一个扰动模型,对车辆的位置进行干扰。该模型主要由 5 部分组成,分别是车辆模型、扰动模型、偏差求解、导航算法和转向系统。将插秧机的速度设定为 1 m/s,初始航向偏差为 5°,初始横向偏差为 0.1 m,初始位置坐标为(0.9,1),仿真时间为 18 s,仿真步长为 0.1 s。

通过 Matlab/Simulink 搭建系统仿真模型,如图 5 所示。

预定义路径如图 6 所示,该路径是井关 PZ60 型插秧机作业时的标准路径,其转弯半径为 0.9 m。

从图 6 可以看出,插秧机在田间作业时行走的

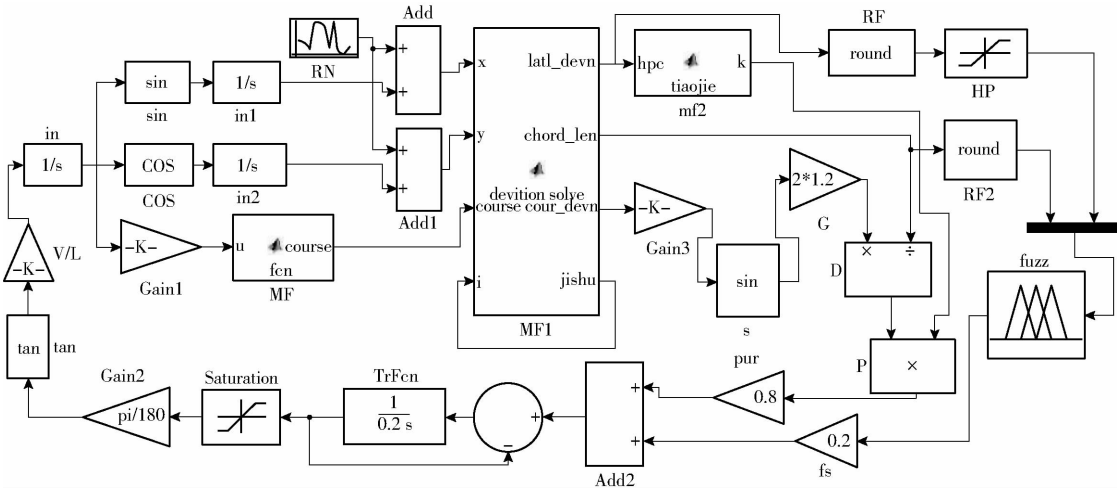


图 5 路径跟踪仿真框图

Fig. 5 Simulation block diagram of path tracking

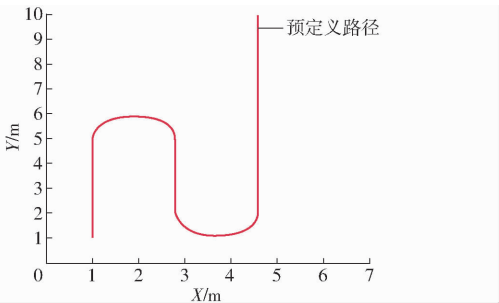


图 6 预定义路径

Fig. 6 Predefined path tracking

路径包括直线段和转弯曲线段,因此要实现其完全自动导航,其控制算法必须满足既能实现直线路径跟踪,又能实现曲线路径跟踪。为了清楚地表达跟踪效果,利用 Matlab 编写了路径跟踪效果图界面,如图 7 所示。

从图 7 右侧的偏差波动图可以看出,在跟踪的

起始阶段有 0.1 m 的横向偏差,仿真曲线也出现了一定程度的振荡,但很快便与预定义路径很好的重合,只有在转弯的地方出现了少许偏差。在整个仿真路径跟踪过程中,横向偏差基本维持在 5 cm 以内,而航向偏差除了在转弯处出现较大的偏差外,基本维持在 10° 以内。仿真结果表明:该导航控制算法从理论上是可行的。

4 实车试验

4.1 试验与数据采集

试验车为经过改造的井关 PZ60 型插秧机, GPS 接收机采用约翰迪尔生产的 GreenStar3000 型接收机,该接收机集成了位置传感器、速度传感器和陀螺仪传感器^[21],采样频率为 5 Hz,数据通过 CAN 总线发送到控制器中。控制器使用约翰迪尔公司自主研

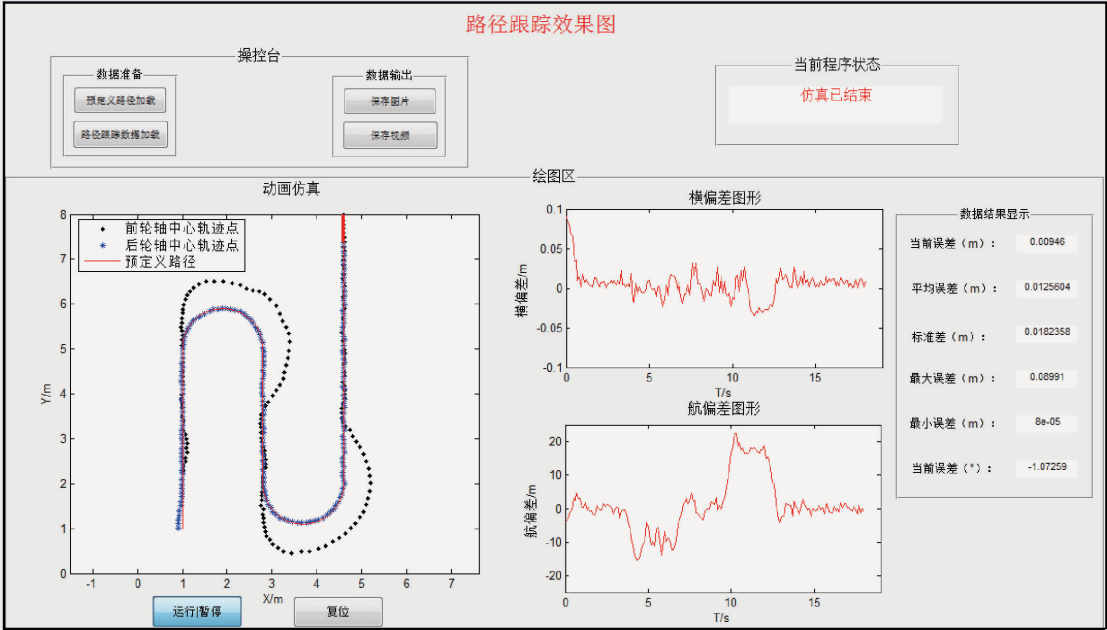


图 7 导航控制效果图界面

Fig. 7 Navigation control effect diagram

发的 GS2630 型控制器,该控制器内集成 3 种导航模式,分别是:SF1 模式,精度为 $\pm 33\text{ cm}$;SF2 模式,精度为 $\pm 10\text{ cm}$;RTK 模式,精度为 $\pm 2\text{ cm}$ 。前两种导航模式只需 1 个 GPS 接收机即可,而最后一种导航模式需要 2 个 GPS 接收机,其中一个为基站。改进纯追踪导航控制算法存储于计算机内,其含有导航控制软件,两者之间通过 CAN 总线进行数据通讯。自动方向盘采用约翰迪尔公司生产的 AutoTrac200 型转向套件,将其安装在井关 PZ60 型插秧机上,通过计算机操作即可实现导航控制。

改装后的插秧机如图 8 所示。通过 CAN 记录仪采集数据,实时保存导航过程中产生的数据,主要包括车辆的位置、速度、航向、横向偏差和航向偏差等,以便在试验结束后对导航效果进行分析。



图 8 试验插秧机

Fig. 8 Experimental transplanter

试验在农场水田中进行,有较多的水,泥脚深度约为 20 cm。首先人工驾驶插秧机沿标记好的路径慢速行走,利用车载 GPS 接收机记录路径数据,将该数据修正后作为自动导航的预定义路径。然后将插秧机驾驶到数据记录的起始位置,开启自动导航模式,实现无人驾驶。图 9 为插秧机在水田中自动导航行驶现场图。

4.2 数据分析

将自动导航时行驶的路径数据和预定义路径数据进行对比,可以得到路径跟踪的误差。图 10 为插秧机在水田中自动导航时的数据分析图。

对比数据分析得出,路径跟踪的平均误差为 0.096 m,最大跟踪误差为 0.183 m,最大跟踪误差出现在插秧机转弯过程中,但直线作业段路径跟踪的平均误差为 0.058 m,最大跟踪误差为 0.135 m,该误差在插秧机作业允许的误差范围内,表明该导航控制算法具有良好的导航效果。综合转弯与直线路

径跟踪数据,平均跟踪误差为 0.077 m,最大跟踪误差为 0.159 m。



图 9 插秧机水田自动导航现场图

Fig. 9 Automatic navigation scene of transplanter in paddy field

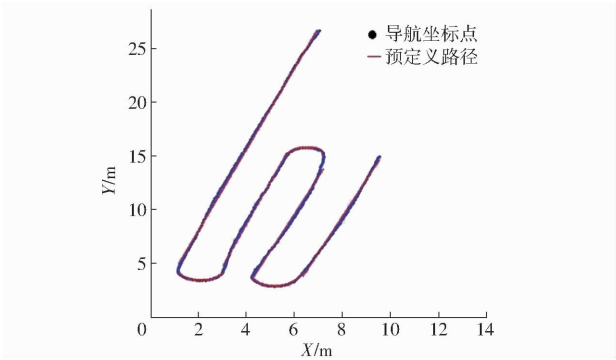


图 10 插秧机水田作业路径跟踪试验结果

Fig. 10 Experimental results of paddy field operation path tracking for rice transplanter

5 结论

(1) 提出通过动态调整前视距离的方法对插秧机进行目标点的确定,这样能够减小插秧机在导航过程中的横向偏差和航向偏差,有利于提高导航精度。

(2) 提出了一种改进纯追踪模型的插秧机导航路径跟踪算法,该控制算法不仅可以进行直线路径跟踪,也可以进行曲线路径跟踪,并能适应车辆速度的变化,实现插秧机在田间的智能控制。其转向灵活,有较好的实时性和鲁棒性。

(3) 设计的导航控制算法利用航向偏差实现对直线路径和转弯曲线路径的跟踪,并用横向偏差作为观测量实现对控制量的补偿。试验结果表明:当行驶速度为 1 m/s 时,平均跟踪误差为 0.077 m,最大跟踪误差为 0.159 m,满足插秧机自动导航控制的要求。

参 考 文 献

1 张美娜,吕晓兰,陶建平,等. 农用车辆自主导航控制系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(7):42-47. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160707&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.007. ZHANG Meina, LÜ Xiaolan, TAO Jianping, et al. Design and experiment of automatic guidance control system in agricultural vehicle[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(7):42-47. (in Chinese)

2 REID J F, ZHANG Q, NOGUCHI N, et al. Agriculture automatic guidance research in North America [J]. Computers and Electronics

- in Agriculture, 2000, 25(1-2): 155-167.
- 3 TORRI T. Research in autonomous agriculture vehicles in Japan [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 25: 155-167.
 - 4 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): 30-35. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160105&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.005.
 - ZHANG Wenyu, DING Youchun, WANG Xueling, et al. Purepursuit control method based on SVR inverse-model for tractor navigation [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 30-35. (in Chinese)
 - 5 田海清, 应义斌, 张方明. 农业车辆导航系统中自动控制技术的研究进展[J]. 农业机械学报, 2005, 36(7): 148-152.
 - TIAN Haiqing, YING Yibin, ZHANG Fangming. Development of automatic control technology for agricultural vehicle guidance [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(7): 148-152. (in Chinese)
 - 6 NAGASAKA Y, SAITO H, TAMAKI K, et al. An autonomous rice transplanter guided by global positioning system and inertial measurement unit [J]. Journal of Field Robotics, 2009, 26(6-7): 537-548.
 - 7 KISE M, NOGUCHI N, ISHII K, et al. Development of the agricultural autonomous tractor with an RTK-GPS and a FOG[C]//IFAC: Proceedings of the 4th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles, 2001: 103-106.
 - 8 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)
 - 9 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 Application, 2010, 46(21): 216-219. (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?file_no=20130139&flag=1. 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 张智刚, 罗锡文, 周志艳, 等. 久保田插秧机的 GPS 导航控制系统设计[J]. 农业机械学报, 2006, 37(7): 95-97.
 - ZHANG Zhigang, LUO Xiwen, ZHOU Zhiyan, et al. Design of GPS navigation control system for rice transplanter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(7): 95-97. (in Chinese)
 - 12 周建军, 张漫, 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 vehicles based on fuzzy control [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 151-156. (in Chinese)
 - 13 熊中刚, 贺娟, 敖邦乾, 等. 基于路径弯曲度动态预测搜索算法的车辆路径跟踪控制软件系统设计[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(2): 370-373.
 - 14 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)
 - 15 薛金林, 张顺顺. 基于激光雷达的农业机器人导航控制研究[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 55-60. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140909&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.09.009.
 - XUE Jinlin, ZHANG Shunshun. Navigation of an agricultural robot based on laser radar [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 55-60. (in Chinese)
 - 16 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 tractors automatic steering [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(8): 116-119. (in Chinese)
 - 17 丁永前, 王致情, 林相泽, 等. 自主跟随车辆航向控制系统[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 8-13. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150102&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.002.
 - DING Yongqian, WANG Zhiqing, LIN Xiangze, et al. Heading control system of autonomous following vehicle [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 8-13. (in Chinese)
 - 18 赵德安, 贾伟宽, 张云, 等. 农业机器人自主导航改进自适应滤波控制器研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 1-6. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150501&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.001.
 - ZHAO Dean, JIA Weikuan, ZHANG Yun, et al. Design of agricultural robot autonomous navigation control based on improved self-adaptive filter [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 1-6. (in Chinese)
 - 19 张闻宇, 丁幼春, 廖庆喜, 等. 拖拉机液压转向变论域模糊控制器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 43-50. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150307&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.007.
 - ZHANG Wenyu, DING Youchun, LIAO Qingxi, et al. Variable universe fuzzy controller for tractor hydraulic steering [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 43-50. (in Chinese)
 - 20 迟德霞, 任文涛, 由佳翰, 等. 水稻插秧机导航控制器设计与路径追踪仿真研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2016, 47(3): 363-367.
 - CHI Dexia, REN Wentao, YOU Jiahao, et al. Design on navigation controller and path tracking simulation of rice transplanter [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2016, 47(3): 363-367. (in Chinese)
 - 21 张铁民, 李辉辉, 陈大为, 等. 多源传感器信息融合的农用小车路径跟踪导航系统[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 37-42. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150306&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.006.
 - ZHANG Tiemin, LI Huihui, CHEN Dawei, et al. Agricultural vehicle path tracking navigation system based on information fusion of multi source sensor [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 37-42. (in Chinese)