

# 农机自动导航控制决策方法与软件系统

魏爽<sup>1</sup> 季宇寒<sup>1</sup> 曹如月<sup>2</sup> 李世超<sup>2</sup> 张漫<sup>1</sup> 李寒<sup>2</sup>

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 中国农业大学农业部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 为实现农机自动导航控制, 兼顾系统成本和作业效率, 对农机自动导航控制决策方法进行了研究, 并设计开发了一种导航软件系统。首先, 系统根据获取的农田边界、农田形状及作业需求进行路径规划。其次, 采用简化二轮车运动学模型, 采用模糊控制进行导航决策控制, 模糊控制器的输入参数为农机横向偏差和航向偏差, 输出参数为前轮转角信息。最后, 导航系统根据转角信息, 由 PLC 控制器控制方向盘转动, 从而实现导航控制。导航软件采用模块化设计思想, 由串口数据通讯、数据分析与处理、数据与图形显示和数据存储 4 个模块构成, 基于 C++/MFC 语言编写实现。系统还可在导航结束后, 对导航偏差数据进行保存, 便于试验后进行误差分析。试验结果表明: 农机自动导航控制决策方法可以实现较好的控制精度, 软件系统界面友好、通讯稳定、功能较为齐全, 满足农机田间自动导航作业的需求。

**关键词:** 农机; 自动导航; 控制决策; 软件设计

**中图分类号:** S232.3; TP272 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)S0-0030-05

## Decision Control Method and Software of Automatic Navigation System for Agricultural Machinery

WEI Shuang<sup>1</sup> JI Yuhan<sup>1</sup> CAO Ruyue<sup>2</sup> LI Shichao<sup>2</sup> ZHANG Man<sup>1</sup> LI Han<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to realize agricultural machinery automatic navigation control, and taking into account the system cost and operation efficiency, the automatic navigation control decision method was studied, and a navigation software system was designed and developed. Firstly, the system conducted path planning according to the field boundary, the field shape and working requirements. Secondly, the simplified two-wheel vehicle kinematic model was used and the fuzzy control was adopted for navigation control decision. And the input parameters of the fuzzy controller were the lateral deviation and the heading deviation of agricultural machinery, and the output parameter was the steering angle data. Finally, using the steering angle data, the machine was controlled by the steering wheel through PLC controller. The modular design ideas were adopted in software development. The software mainly consisted of four modules: serial data communication, data analysis and processing, data and graphic display and data storage. It was developed based on C++/MFC programming language. The software can analyze and process the received data, such as GNSS positioning data, angle sensor data, attitude sensor data and PLC controller data, then send the corresponding control decision information to the PLC controller. In addition, the system can store the deviation data for error analysis after the navigation. The experimental results demonstrated that the automatic navigation control decision method can achieve preferable control precision. The software has user-friendly interface, stability communication and relatively complete function, so that the proposed automatic navigation control decision and software system can meet the field operation requirements for agricultural machinery.

**Key words:** agricultural machinery; automatic navigation; control decision; software design

收稿日期: 2017-06-05 修回日期: 2017-11-19

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2017YFD0700400-2017YFD0700403)、国家自然科学基金项目(31571570)、国家国际科技合作专项(2015DFG12280)和北京市科技计划项目(D161100001416002)

**作者简介:** 魏爽(1991—), 女, 硕士生, 主要从事农机自动导航系统研究, E-mail: sepshuang@163.com

**通信作者:** 张漫(1975—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事精细农业及其支持技术研究, E-mail: cauzm@cau.edu.cn

## 引言

农机自动驾驶技术是实现现代化精细农业生产的一项重要技术。早在 20 世纪 90 年代,美国、日本等国家就针对精细农业生产开发了农机自动驾驶系统。NOGUCHI 等<sup>[1]</sup>在 1998 年研发了机器视觉、RTK-GPS 和 DGS 多传感器融合的农机导航系统。ZHANG 等<sup>[2]</sup>在 1999 年开发了一套融合视觉传感器、光纤陀螺仪和 RTK-GPS 的自动驾驶系统,并设计了转向控制器。SONG 等<sup>[3]</sup>采用 RTK-GPS、惯性测量单元、陀螺仪和角度传感器等开发了割草拖拉机,设计了路径规划和控制方法。此外,国外的生产商如 Trimble 公司、John Deere 公司、Ag Leader 公司和 Topcon 公司等都自主研发了农机自动驾驶系统并已实现产品化,可完成多功能高效化的作业任务<sup>[4-6]</sup>。

国内农机导航系统研究相对起步较晚,但近年来随着中国北斗卫星导航系统的逐步完善,农机自动驾驶技术发展迅速<sup>[7-8]</sup>。目前,农机导航控制决策方法主要有模糊控制、自适应模糊控制和 PID 控制等<sup>[9-10]</sup>。尹纯源等<sup>[11]</sup>提出了一种模糊 PID 变阻尼控制方法,降低了系统的超调和振荡。张闻宇等<sup>[12]</sup>设计了一种摩擦轮式转向系统,提高了拖拉机自动驾驶稳定性。在导航系统设计上,主要实现路径规划、跟踪控制、导航监控等功能<sup>[13-18]</sup>。张亚娇等<sup>[19]</sup>开发了一个基于 WinCE 嵌入式农机车辆自动驾驶监控系统,可实时监控操纵农机行驶。熊中刚等<sup>[20]</sup>开发了一套高速插秧机自动驾驶运行参数远程监测系统软件。此外,北京合众思壮、上海司南等公司研发出基于 GNSS 定位的农机自动驾驶系统产品并推向市场<sup>[21]</sup>。

相比于 Trimble、John Deere 及 Topcon 等公司的产品,国内自动驾驶系统产品参数调节缺乏适应性,不支持全局路径规划和转弯路径规划,作业负载高、行驶速度快时导航误差较大,研发适合国内农业生产且成本较低的农机自动驾驶系统愈发重要。因此,本文设计一种农机自动驾驶软件系统,以期实现对多传感器信息采集处理、路径规划和自动控制决策支持等功能。

## 1 系统设计与方法

### 1.1 农机自动驾驶系统

农机自动驾驶软件系统要求具有数据实时通讯功能,可根据需求设置不同的波特率,同时要保证数据传输过程中的实时性和准确性;具有数据分析与处理功能,实现路径规划功能并给出控制决策;具有

数据读写功能,实现对作业地块信息的保存;具有良好的人机交互界面,操作简洁方便,布局合理。

根据以上需求,导航软件系统总体设计结构如图 1 所示。GNSS 接收机和天线用于采集农机位置信息,姿态传感器用于 GNSS 定位信息的补偿;角度传感器用于采集前轮转角数据并传输给可编程逻辑控制器(Programmable logic controller, PLC);GNSS 位置信息、姿态信息和 PLC 采集到的信息均通过串口与工控机通讯,由工控机处理数据并生成相应的控制决策;PLC 接收到控制策略,通过发送脉冲信号控制电动机转动,转台电动机安装在方向盘上,实现对方向盘的控制,从而控制拖拉机自动驾驶作业。

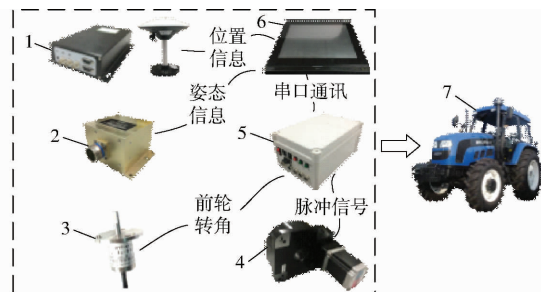


图 1 系统总体设计

Fig. 1 Ensemble design of system

1. GNSS 接收机和天线 2. 姿态传感器 3. 角度传感器 4. 转台和步进电动机 5. PLC 6. 工控机 7. 拖拉机

### 1.2 路径规划方法

在实际农业生产中,农田一般都是四边形,本文以矩形农田区域为例,采用折返式作业方式时分为沿长边行走和沿短边行走,不同的行走方式有不同的转弯次数,如图 2 所示。 $D$  为农机作业幅宽, $L$  为农田区域长边长度, $H$  为农田区域短边长度。

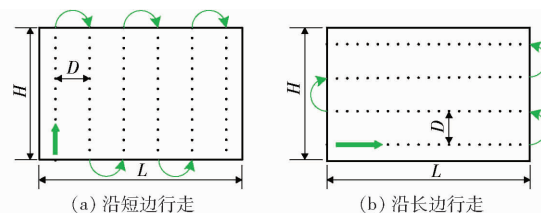


图 2 矩形农田区域导航线

Fig. 2 Navigation line of rectangular field

沿短边行走和沿长边行走的转弯次数  $N_1$  和  $N_2$  (运算符  $[]$  表示取整) 为

$$N_1 = \begin{cases} \frac{L}{D} - 1 & (L \text{ 可整除 } D) \\ \left[ \frac{L}{D} \right] & (L \text{ 不可整除 } D) \end{cases} \quad (1)$$

$$N_2 = \begin{cases} \frac{H}{D} - 1 & (H \text{ 可整除 } D) \\ \left[ \frac{H}{D} \right] & (H \text{ 不可整除 } D) \end{cases} \quad (2)$$

首先确定导航平行线的基准线,为使作业转弯消耗最小,转弯次数少,选择沿长边行走方式;然后根据用户输入的农机作业幅宽确定导航线间距,生成一系列平行于基准线的作业导航线并覆盖整块区域。确定基准线方式分为两种情况:①在农田区域较小情况下,可以人工采集农田的4个边界点经纬度信息,根据4个边界点确定区域的4条边,选用长边作为导航线的基准线。②在农田区域较大情况下,由于人工采集位置信息不方便,可以设置A、B点,将A、B两点连线及延长线作为导航线的基准线。

### 1.3 模糊控制方法

系统采用简化二轮车运动学模型,假设农机在行驶过程中不存在侧向滑动且左右轮胎对称<sup>[22-23]</sup>,则将四轮车简化为二轮车模型,如图3所示。 $XOY$ 为农机所在坐标系, $\alpha$ 为农机的方位角, $\delta$ 为农机的转向角, $l$ 为农机前后轮轴距, $v$ 为农机行驶速度, $v_x$ 、 $v_y$ 为农机横向和纵向速度。

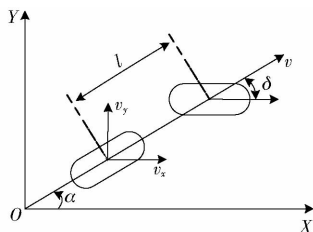


图3 简化二轮车运动学模型

Fig. 3 Simplified two-wheel vehicle kinematic model

根据模型可得农机运动学方程

$$\begin{cases} v_x = v \cos \alpha \\ v_y = v \sin \alpha \\ \delta = \frac{v}{l} \tan \alpha \end{cases} \quad (3)$$

建立农机运动学模型后,系统采用模糊控制方法实现对农机自动驾驶控制。模糊控制器的设计主要包括3部分:

(1)模糊化:将农机行驶过程中的横向偏差和航向偏差作为模糊控制器的输入变量,规定农机位于导航线右侧时横向偏差为正,左侧时为负,基本论域为 $[-30 \text{ cm}, 30 \text{ cm}]$ ,量化等级为 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ,量化因子 $K_{Ld}=0.2$ 。规定航向偏差前轮右转时为正,左转时为负,基本论域为 $[-12^\circ, 12^\circ]$ ,量化等级与横向偏差相同,量化因子为 $K_{Hd}=0.5$ 。将前轮期望转角作为模糊控制器的输出变量,基本论域为 $[-12^\circ, 12^\circ]$ ,量化等级、量化因子与航向偏差相同。

(2)模糊控制规则建立:是模糊控制方法的核心部分,根据规定的基本论域、量化等级和量化因子建立模糊控制规则。横向偏差、航向偏差和前轮期

望转角的模糊等级均可以划分为7个模糊子集,即负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZE)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB)。隶属度函数均采用三角形隶属度函数。

(3)解模糊:根据模糊控制规则,采用重心法(COA)从前轮期望输出转角的模糊集合中解算出精确输出值

$$u_{fc}(x_k, y_k) = \frac{\sum_i u_i u_u(x_k, y_k, u_i)}{\sum_i u_u(x_k, y_k, u_i)} \quad (4)$$

式中  $u_{fc}(x_k, y_k)$ ——模糊控制器的输出精确值

$u_i$ ——输出模糊集合的离散元素

$u_u(x_k, y_k, u_i)$ ——该元素的隶属度函数

$x_k, y_k$ ——横向偏差和航向偏差的输入量

### 1.4 软件设计

导航软件采用模块化设计思想,由串口数据通讯、数据分析与处理、数据与图形显示和数据存储4个模块构成。

#### 1.4.1 串口数据通讯

数据通讯模块主要功能有端口选择、波特率设置等,采用RS232串口通讯协议。串口数据通讯模块可实现传感器与工控机之间的双向数据交流,即农机自动驾驶系统将接收到的GNSS定位数据、角度传感器数据、姿态传感器数据和PLC控制器数据进行分析处理后,将相应的控制决策信息发送给PLC控制器。

#### 1.4.2 数据分析与处理

数据分析与处理模块是农机自动驾驶软件系统的核心部分,主要功能包括GNSS数据解析、时间和空间配准、路径规划和导航控制等,如图4所示。导航软件将采集到的各传感器数据进行解析,将大地坐标系转化为高斯投影平面坐标系,并设置统一的数据采集频率,实现时间和空间配准。根据作业需求及地块边界,选择不同的导航方式,其中A、B点直线导航可实现作业路径规划。自动驾驶开始后,软件根据计算得到的横向偏差及航向偏差进行自动驾驶作业。

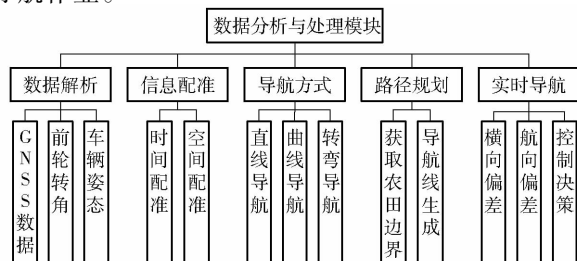


图4 数据分析与处理模块功能

Fig. 4 Function of data analysis and processing module

### 1.4.3 数据与图形显示

数据与图形显示模块是人机交互信息的重要途径,方便用户实时查看导航作业情况,主要分为数据显示和图形显示,如图5所示。数据显示包括卫星差分状态、经纬度、横滚俯仰角、横向偏差、航向偏差、时间、车辆速度和农田面积等;图形显示包括标定的原点、农田作业边界、规划路径和导航路径。

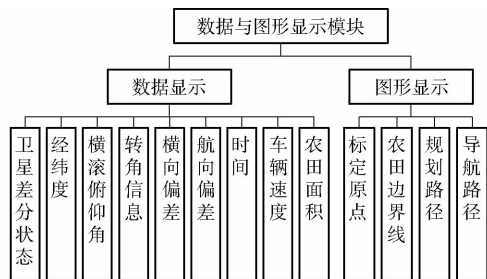


图5 数据与图形显示模块功能

Fig.5 Function of data and graph display module

### 1.4.4 数据存储

数据存储模块功能主要包括:①存储农田信息,方便下次作业直接调出农田边界及农田面积等信息。②存储规划路径、导航路径、横向偏差和航向偏差等信息,用于试验后导航误差分析。③数据存储格式选用为.txt文件格式,可直接导出成Excel表格,方便分析处理。

### 1.4.5 系统工作流程

基于以上功能模块,系统工作流程如图6所示。首先打开串口并设置参数,接收传感器信息并进行坐标转换;用户给出是否首次作业来判定是否需要获取农田边界;然后标定原点,进行路径规划,生成导航线和控制决策,开始自动驾驶作业;导航结束,保存数据。

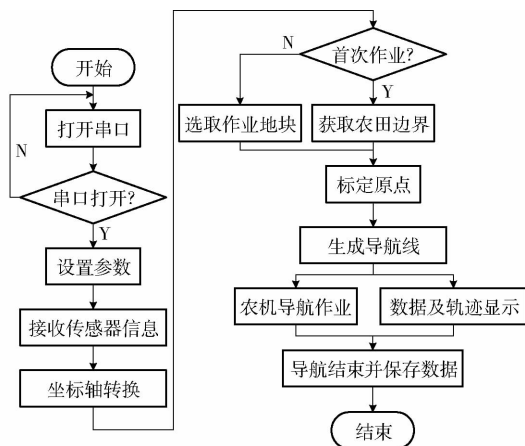


图6 系统工作流程图

Fig.6 Working flowchart of system

## 2 系统实现与试验

### 2.1 系统实现

根据农机自动驾驶系统需求与设计目标,在系

统开发与实现方面既要保证系统的适用性、鲁棒性和程序可移植性,又要保证用户界面友好性。

基于C++/MFC框架开发了农机自动驾驶软件系统。MFC是微软公司提供的类库,以C++类的形式封装了Windows API,包含了一个应用程序框架,减少了代码的编写量。在图形绘制方面,使用ChatCtrl绘图控件系统可显示农田边界、规划路径、农机实时位置和作业路径。在系统界面设计上,重写Tab control控件实现分页功能,系统包括了配置页、状态页、导航作业页和帮助页等。

### 2.2 系统试验

#### 2.2.1 路径规划试验

为验证路径规划方法实用性,设计了路径规划试验。首先,系统获取农田边界,选定最长边为导航平行线生成的基准线;然后,根据设置的农机作业幅宽和最小转弯半径生成导航线,试验效果如图7所示。

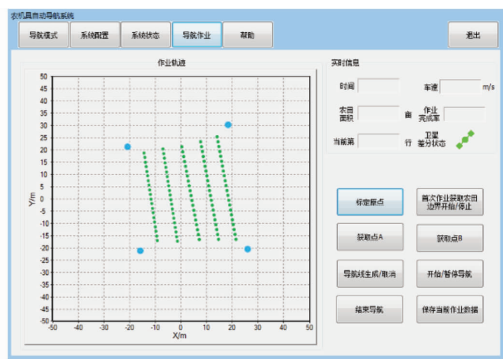


图7 路径规划试验效果图

Fig.7 Effect picture of path plan experiment

#### 2.2.2 系统控制性能试验

为验证模糊控制方法控制精度,设计了系统控制性能试验。系统根据规划的路径进行自动驾驶作业,作业完成后计算导航误差。在农机行驶速度为0.8、1.0、1.2 m/s的情况下,导航平均误差为2.87、3.34、4.16 cm。

## 3 结论

(1)基于C++实现了农机自动驾驶软件,进行了试验验证。在农机行驶速度为0.8、1.0、1.2 m/s的情况下,导航平均误差为2.87、3.34、4.16 cm。

(2)路径规划试验表明,系统可以根据不同的地块信息、用户设置生成不同的导航线,以达到作业消耗最小的目的。

(3)系统控制性能试验表明,设计的模糊控制器可以实现对农机自动控制。后续研究将考虑改进路径规划方法,提出适用于任意多边形农田区域的全局路径规划方法,以提高农机自动驾驶系统的通用性。

## 参 考 文 献

- 1 NOGUCHI N, REID J F, WILL J, et al. Vehicle automation system based on multi-sensor integration[C]. ASAE Paper 983111, 1998.
- 2 ZHANG Q, REID J F, NOGUCHI N. Agricultural vehicle navigation using multiple guidance sensors[C]//Proceedings of the International Conference on Field and Service Robotics, 1999: 293 - 298.
- 3 SONG M Z, KANG S W, CHUNG S O, et al. Development of path planning algorithm for an autonomous mower tractor[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2013, 46(18): 154 - 158.
- 4 武宝传,马立萍. 浅谈 GPS 自动导航在农用拖拉机上的推广与应用[J]. 农业机械,2012,25(9):125 - 127.
- 5 靳俊栋,赵祚喜,黄培奎,等. 约翰迪尔 AutoTrac 自动导航系统通用性应用研究[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(增刊): 15 - 20. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2015S003&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2015S003&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.003.
- JIN Jundong, ZHAO Zuoxi, HUANG Peikui, et al. Applied research on John Deere AutoTrac automatic navigation's versatility[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(Supp.): 15 - 20. (in Chinese)
- 6 王喆. 播种作业导航控制系统优化与终端设计[D]. 石河子:石河子大学,2014.
- WANG Zhe. Optimize navigation control system of seeding operations and terminal design[D]. Shihezi: Shihezi University, 2014. (in Chinese)
- 7 张圣光. 北斗卫星导航系统在农业机械化中的应用与发展前景[J]. 现代农业科技,2014(4):184 - 189.
- ZHANG Shengguang. Application and development prospects of Beidou navigation satellite system in agricultural mechanization[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2014(4): 184 - 189. (in Chinese)
- 8 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)
- 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. [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)
- 10 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 - 152,162.
- 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, 162. (in Chinese)
- 11 尹纯源,王卓,白晓平,等. 基于模糊 PID 变阻尼方法的农机自动转向控制系统研究[J]. 中国农机化学报,2016,37(11): 111 - 115.
- 12 张闻宇,丁幼春,王磊,等. 拖拉机自动导航摩擦轮式转向驱动系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(6):32 - 40. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170604&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170604&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.004.
- ZHANG Wenyu, DING Youchun, Wang Lei, et al. Design and experiment on automatic steering control system of friction drive for tractor [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 32 - 40. (in Chinese)
- 13 胡炼,罗锡文,张智刚,等. 基于 CAN 总线的分布式插秧机导航控制系统设计[J]. 农业工程学报,2009,25(12):88 - 92.
- HU Lian, LUO Xiwen, ZHANG Zhigang, et al. Design of distributed navigation control system for rice transplanters based on controller area network[J]. Transactions of the CSAE,2009, 25(12): 88 - 92. (in Chinese)
- 14 贾全. 拖拉机自动导航系统关键技术研究[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院,2013.
- JIA Quan. Study on key technology of tractor auto-navigation system [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2013. (in Chinese)
- 15 李青睿. 农机自动导航模拟系统轨迹跟踪的设计与实现[D]. 广州:华南理工大学,2015.
- LI Qingrui. The design and realization of trajectory tracking for tractor autonomous driving simulation system [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015. (in Chinese)
- 16 隋铭明,沈飞,徐爱国,等. 基于北斗卫星导航的秸秆机械化还田作业管理系统[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(1):23 - 28. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160104&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160104&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.004.
- SUI Mingming, SHEN Fei, XU Aiguo, et al. Management system for mechanized straw returning based on BDS [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 23 - 28. (in Chinese)
- 17 薛龙,马蓉. 拖拉机自动驾驶监控系统软件设计[J]. 农机化研究,2015,37(7):89 - 92.
- XUE Long, MA Rong. Software design of automatic driving monitoring system for tractor[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(7): 89 - 92. (in Chinese)

Chinese)

- 12 庞晓敏, 闵子建, 阚江明. 基于 HSI 和 LAB 颜色空间的彩色图像分割[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2011, 36(6): 976-980.  
PANG Xiaomin, MIN Zijian, KAN Jiangming. Color image segmentation based on HSI and LAB color space[J]. Journal of Guangxi University: Nat. Sci. Ed., 2011, 36(6): 976-980. (in Chinese)
- 13 皱秋霞, 杨林楠, 彭琳, 等. 基于 Lab 空间和 K-means 聚类的叶片分割算法研究[J]. 农机化研究, 2015, 37(9): 222-226.  
ZOU Qiuxia, YANG Linnan, PENG Lin, et al. Segmentation algorithm based on blade Lab space and K-means clustering[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(9): 222-226. (in Chinese)
- 14 崔世钢, 次丹妮, 梁帆. 基于 Lab 颜色空间和遗传算法的苦苣菜叶片病斑分割[J]. 天津职业技术师范大学学报, 2015, 25(3): 4-7.  
CUI Shigang, CI Danni, LIANG Fan. Segmentation of common sow thistle leave disease spots based on Lab color space and genetic algorithm[J]. Journal of Tianjin Vocational Technical Teachers' College, 2015, 25(3): 4-7. (in Chinese)
- 15 李旺. 基于图像处理的黄瓜叶部病害识别研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2013.  
LI Wang. Research on the cucumber leaf diseases recognition based on image processing[D]. Changsha: Agricultural University of Hunan, 2013. (in Chinese)
- 16 任守纲, 陆海飞, 袁培森, 等. 基于显著性检测的黄瓜叶部病害图像分割算法[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 11-16. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160902&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160902&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.002.  
REN Shougang, LU Haifei, YUAN Peisen, et al. Segmentation algorithm of cucumber leaf disease image based on saliency detection[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 11-16. (in Chinese)
- 17 诸葛木子. 基于计算机图像处理的作物叶部病害提取方法与技术研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2014.  
ZHUGE Muzi. Study on crop leaf disease extraction system based on computer image processing[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014. (in Chinese)
- 18 邱道尹, 张红涛, 陈铁军, 等. 基于机器视觉的大田害虫检测系统[J]. 农业机械学报, 2007, 38(1): 120-122.  
QIU Daoyin, ZHANG Hongtao, CHEN Tiejun, et al. Design of detection system for agriculture field pests based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(1): 120-122. (in Chinese)
- 19 越鲜梅. 基于图像识别的向日葵叶部病害诊断技术研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2013.  
YUE Xianmei. Research on sunflower leaf disease diagnosis based on imaging identification[D]. Huhhot: Inner Mongolia University of Technology, 2013. (in Chinese)
- 20 唐耀华, 郭为民, 高静怀. 基于核相似性差异最大化的支持向量机参数选择算法[J]. 模式识别与人工智能, 2010, 23(2): 210-215.  
TANG Yaohua, GUO Weimin, GAO Jinghui. SVM parameter selection algorithm based on maximum kernel similarity diversity[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2010, 23(2): 210-215. (in Chinese)
- 21 次丹妮. 基于计算机视觉的花卉叶部病害识别方法研究[D]. 天津: 天津职业技术师范大学学报, 2016.  
CI Danni. Research of the recognition method of flower leaves diseases based on computer vision[D]. Tianjin: Journal of Tianjin Vocational Technical Teachers' College, 2016. (in Chinese)

(上接第 34 页)

- 18 张小龙, 盛丹丹, 夏萍, 等. 拖拉机导航作业中虚拟无线通讯系统[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 190-195. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20130433&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130433&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.04.033.  
ZHANG Xiaolong, SHENG Dandan, XIA Ping, et al. Virtual wireless communication realization in agricultural tractor navigation system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 190-195. (in Chinese)
- 19 张亚娇, 张智刚, 罗锡文, 等. 基于 WinCE 的农机导航监控终端软件系统设计与实验[J]. 农机化研究, 2016, 38(1): 70-75.
- 20 熊中刚, 左源岸, 杨莎. 基于插秧机自动导航运行参数远程监测系统软件设计[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(3): 251-256.  
XIONG Zhonggang, ZUO Yuan'an, YANG Sha. Software design of remote monitoring system based on the parameter of rice transplanter automatic navigation[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(3): 251-256. (in Chinese)
- 21 罗锡文, 廖娟, 邹湘军, 等. 信息技术提升农业机械化水平[J]. 农业工程学报, 2016, 32(20): 1-14.
- 22 余恭敏. 车辆运动学/动力学模型辅助的车载自主导航系统[D]. 南昌: 南昌大学, 2014.  
YU Gongmin. Vehicle kinematic model and vehicle dynamic model aided the vehicle autonomous navigation system[D]. Nanchang: Nanchang University, 2014. (in Chinese)
- 23 孟庆宽, 仇瑞承, 张漫, 等. 基于改进粒子群优化模糊控制的农业车辆导航系统[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 29-36, 58. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150305&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150305&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.005.  
MENG Qingkuan, QIU Ruicheng, ZHANG Man, et al. Navigation system of agricultural vehicle based on fuzzy logic controller with improved particle swarm optimization algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 29-36, 58. (in Chinese)