

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.021

太阳能渠道式喷灌机自主导航研究

刘柯楠¹ 吴普特^{1,2} 朱德兰^{1,2} 韩文霆² 代文凯¹

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 以自行研制的太阳能渠道式多喷头喷灌机为试验平台,利用偏角传感器和电子罗盘进行农业机械装备的自动导航研究。增加了喷灌机精准灌溉控制系统、喷洒域可控系统,实现了喷灌机的自动控制。根据偏角传感器、电子罗盘和车轮转速传感器获取的喷灌机姿态信息,构建了喷灌机自主导航模糊控制器。喷灌机通过调节两侧驱动轮转速差的方式实现转向闭环控制,完成了喷灌机沿渠道的自动行走,并进行了导航跟踪试验。试验结果表明,喷灌机在以 0.5 m/min 和 1.0 m/min 速度进行自主导航过程中均能消除横向偏差,具有一定的精度和可靠性,可满足喷灌机作业使用要求。

关键词: 太阳能; 渠道式喷灌机; 导航; 自动控制; 精准灌溉

中图分类号: TP242.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)09-0141-06

Autonomous Navigation of Solar Energy Canal Feed Sprinkler Irrigation Machine

Liu Ke'nan¹ Wu Pute^{1,2} Zhu Delan^{1,2} Han Wenting² Dai Wenkai¹

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In view of the planting characteristics which are mainly consisted of small farmers and some large growing farmers in China, the solar energy technology was combined with spray irrigation technology together. In addition, a light and small solar energy canal feed sprinkler irrigation machine was developed. An autonomous navigation system was developed on self-developed solar energy canal feed sprinkler machine. Under different working conditions, angle sensor and electronic compass were adopted for the autonomous navigation test. The precision irrigation control system and spraying domain control system were integrated to realize automatic control of sprinkler machine. According to the attitude information of the sprinkler machine acquired from angle sensor, electronic compass and wheel speed sensor, a fuzzy controller for autonomous navigation was built. By adjusting the speed of driving wheels on both sides, a close-loop feedback control system of steering was also built. Besides, to verify the navigation accuracy of the system, a tracking experiment was carried out. The results indicated that the lateral tracking error could be well eliminated with travelling speeds of 0.5 m/min and 1.0 m/min, which showed that the sprinkler machine was provided with high reliability and stability. In other words, the control system can well meet the demand of spraying work.

Key words: solar energy; canal feed sprinkler irrigation machine; navigation; automatic control; precision irrigation

收稿日期: 2016-02-22 修回日期: 2016-04-06

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAD22B01-02)、国家国际科技合作项目(2014DFG72150)和高等学校学科创新引智计划(111计划)项目(B12007)

作者简介: 刘柯楠(1986—),男,博士生,主要从事农业机械自主导航研究,E-mail: kenan_liu@126.com

通信作者: 吴普特(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事水土保持与节水农业研究,E-mail: gjzwpt@vip.sina.com

引言

平移式喷灌机是连续直线移动式喷灌机,无论在喷灌强度的均匀性还是耕作管理方式的适应性方面都比其他型式的喷灌机(如双臂式、中心支轴式、绞盘牵引式等)有更多的优点。然而目前平移式喷灌机主要在内蒙、东北等地区使用,并且多为大型平移式喷灌机,针对我国农业生产特点(小农户和一些种植大户为主)的轻小型移动式喷灌机研究较少。作为能在农田中移动的智能作业平台,喷灌机应能按照提前规划的预定路线自主进行灌溉。要实现自动作业的精确控制,即要对作业路径进行自主导航。目前,在农业机械导航领域应用的导航方式有机器视觉、GPS、地磁、激光和接触式等^[1]。与卫星和机器视觉等其他导航方式相比,采用机械接触的导航方式具有结构简单、成本低、易维护、且在行间作业过程中具有较强实用性和易于推广等特点。

国内外众多学者对农机导航进行了研究^[2-19]。

这些研究虽然都是对农业机械自动导航,但大多都是基于拖拉机、插秧机等传统农业机械装备或是一些用于农业方面的机器人平台,有关轻小型移动式喷灌机导航方面的研究还鲜有报道。为满足农田灌溉的农艺需求,本研究将太阳能技术与喷灌技术进行集成,采用模糊控制算法研发一种基于渠道导航(属于机械接触式)的太阳能驱动自走悬臂式喷灌机,并在此基础上增加喷灌机精准灌溉控制系统和喷洒域可控系统,以期实现喷灌机沿预定路线的自主导航控制。

1 喷灌机总体结构

作为一种能够在田间自主作业的智能移动平台,喷灌机应能按照预定的作业路径在田间自动行走,即具有自主导航功能。基于渠道导航的太阳能自走悬臂式喷灌机(以下简称喷灌机)由机械本体、变量作业系统和自动导航控制系统3部分组成,图1为喷灌机整体结构示意图。

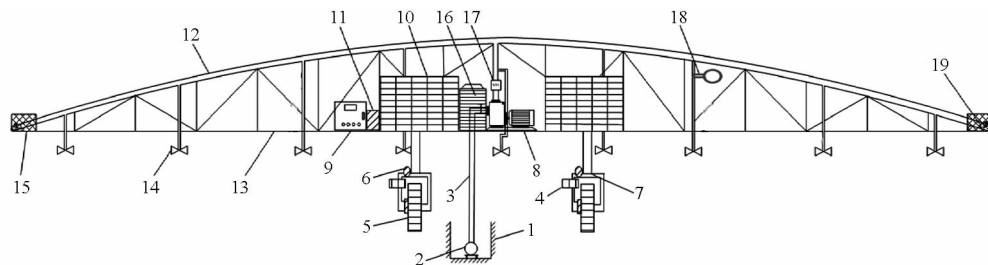


图1 渠道式喷灌机结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of canal feed sprinkler irrigation machine

1. 供水渠道 2. 取水过滤装置 3. 吸水软管 4. 减速驱动电动机 5. 驱动轮 6. 转向装置 7. 主梁 8. 自吸泵 9. 控制柜 10. 太阳能光伏发电系统 11. 蓄电池 12. 主供水管道 13. 桁架 14. 低压喷头 15. 泡沫挡板 16. 施肥罐 17. 流量表 18. 压力表 19. 喷枪

喷灌机机械本体部分是整个喷灌机的硬件主体,包括整个喷灌机主体机架部分、行走驱动部分和太阳能供电部分。主机架部分由上部长50 m的输水桁架和底部支撑部分构成。输水桁架由主输水管、横支撑、斜支撑组成倒三角架结构焊接而成,在其上等间距地布置用于喷灌的灌水器(喷头)。喷灌机可根据农作需要,更换灌水器进行喷水、喷肥、喷药等操作;底部支撑部分采用边梁式,用断面为100 mm×100 mm的方钢焊接而成,同时为了提高土地利用率,不影响作物生长,两前轮间与两后轮之间均无连接轴。为了保持喷灌机具有较好的通过性和承载能力,喷灌机外形尺寸设计为左右轮距3.36 m,前后轴距2.7 m,车梁离地间隙1.3 m,桁架离地间隙1.8 m。

行走驱动部分采用四轮独立驱动,用4个48V200W1800RPM的直流电动机分别为4个车轮提供动力,直流电动机的输出扭矩经减速比 $i=36$ 的行星齿轮减速器后,再经传动比为1:25的蜗蜗

杆减速器,然后传递给电磁离合器进而传送给车轮。同时4个直流电动机均配有用于控制转速的驱动控制器,通过PWM技术输入不同占空比的调节电压控制电动机转速。电动机及驱动器的电源采用48 V、120 A·h的蓄电池进行供电。轮胎选用8.3-20型普通人字形农用轮胎,采用控制两侧驱动轮转速差的转向方式实现转向。

太阳能光伏供电系统是整个系统的能量来源,主要由太阳能光伏组件、免维护铅酸蓄电池和太阳能控制器组成,为行走驱动部分、各传感器和控制系统部分进行供电。本机配备金源电子电器公司制造的CS5M32-260型太阳能板,峰值功率260 W、峰值电压49.71 V,峰值电流5.25 A,开路电压60.49 V,短路电流5.57 A;蓄电池组选用4块河北风帆蓄电池股份有限公司生产的190H52型阀控式全密封铅酸蓄电池串联而成,电池规格12 V/120 A·h;太阳能控制器为供电系统的监控部件,负责对光伏组件的发电状态和蓄电池的充、放电状态进行监控,太阳能

控制器选用合肥尚硕新能源公司生产的 SS48V50A 型最大功率跟踪太阳能控制器。

2 变量作业系统

喷灌机变量作业部分由喷洒域可控和精准灌溉控制 2 部分组成, 可根据事先制定的处方图进行变量灌溉。

2.1 喷洒域可控

由于农田环境的非结构性和复杂性, 喷灌机在实际应用过程中所遇到的地形不一定呈标准的矩形。喷洒域可控技术是将主输水管上的喷头分为多个组, 沿臂架宽度方向, 每边设置 4 个电磁阀, 通过电磁阀开关控制每组喷头启闭。在喷灌机运行中若是遇到地边、篱笆、路面等不需要喷洒的区域, 可选择性地关闭左边或者右边的电磁阀缩小喷洒宽度, 以适应不同地块形状、地边缘区域、路面等特殊避让要求。同时根据喷洒宽度变化, 位于控制柜中的控制器会自动计算调节水泵转速, 保证在不同喷洒宽度的情况下, 确保单位面积喷水量恒定。

2.2 精准灌溉控制

喷灌机在运行过程中可通过无线模块接收土壤墒情检测传感器采集的数据, 分析、计算出作物所需的水量, 控制水泵按所需水量进行供水, 实现对灌溉水量的自动精准控制。精准灌溉控制分为手动控制和自动控制。手动模式时, 可直接通过喷洒量旋钮来调节水泵转速调节泵的流量, 进而控制喷洒量。自动模式时, 数字控制器通过检测喷灌机当前的行驶速度、宽度、土壤墒情传感器采集数据等参数, 自动计算出当前理论水流量; 然后控制器将理论水流量和电磁流量计测得的实际水流量进行比较得出喷洒误差, 根据误差输出信号控制喷洒泵, 从而实现对流量的控制。在整个工作过程中, 无论是喷灌机速度变化、喷洒宽度变化, 喷洒量变化都会被这个闭环控制过程消除, 如图 2 所示。

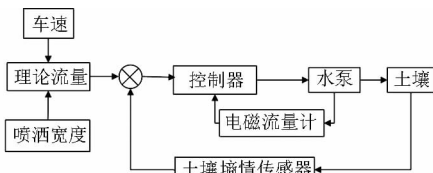


图 2 精准灌溉控制框图

Fig. 2 Block diagram of precision irrigation control

3 导航控制系统

喷灌机采用渠道供水方式, 在沿渠道行走过程中通过从渠道中取水进行喷洒灌溉。喷灌机自主导航系统应具有两方面功能: 一是定位, 确定喷灌机与

预定路线之间的相对位置, 即偏差; 二是决策控制, 根据导航控制算法决策出导航控制量并控制执行机构实现该控制量, 使喷灌机可以沿预定路线自动行走。渠道式喷灌机自动导航系统采用机械接触式导航方式, 包括导航偏角传感器、电子罗盘、主控制器、电动机驱动器、从控制器、转速传感器、电磁流量计、土壤墒情传感器和各执行机构等, 如图 3 所示。

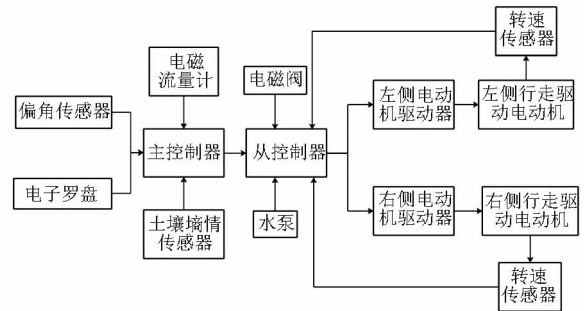


图 3 导航控制系统结构

Fig. 3 Structure of navigation control system

电子罗盘和偏角传感器作为导航用传感器, 实时检测喷灌机与预定路线(渠道)之间的航向偏差与位置偏差。电子罗盘采用无锡北微传感科技有限公司生产的 SEC345 型三维电子罗盘: 航向精度 1° , 高倾角测量范围 $\pm 40^\circ$, 具有硬磁、软磁及倾角补偿功能, 标准 RS232/RS485/TTL 输出接口, 最高输出频率 50 Hz; 偏角传感器选用日本 MIDORI 株式会社绿测器 CP-2UTX 型磁敏角度传感器: 有效电气转角 $\pm 45^\circ$, 独立线性精度 $\pm 1.5\%$ 。系统采样频率 1 Hz, 偏角传感器与电子罗盘固定在喷灌机横向对称中心轴线上。当电子罗盘、偏角传感器、电磁流量计和土壤墒情传感器检测出的数据传入主控制器时, 主控制器将采集到的数据进行分析、处理, 进行导航控制量、需水量和电磁阀启闭的计算和决策, 并生成控制指令通过 RS485 与从控制器进行通信, 将指令传输给从控制器。从控制器通过转速传感器实时检测两侧车轮转速, 对两侧车轮转速进行闭环控制, 并根据主控制器传送来的信息, 对电磁阀和水泵等执行机构进行控制, 使喷灌机可以沿着预定路线行走, 完成自动导航作业。

所构建的喷灌机导航控制系统中, 不同的导航控制量决策算法会对系统稳定性及路径跟踪效果产生重要影响。由于农田环境的非结构化特征, 加上轮胎与土壤之间的相互作用十分复杂, 要建立比较完善的运动学模型十分困难, 因此在模型不十分明确的情况下进行喷灌机导航时, 应该避免过分依赖车辆模型来设计导航控制器。考虑到系统稳定性和路径跟踪的精度要求, 采用模糊控制算法构建了二维模糊控制器。二维模糊控制器以偏角传感器检测

到的位置相对偏差 e_θ 及电子罗盘检测到的方向偏差 e_ψ 作为输入量, 经过导航决策, 输出控制两侧电动机转速的 PWM 电压增量 Δu 。采用模糊控制算法进行导航决策时甚至可以不需要任何模型知识, 喷灌机与预定路径间的航向偏差和位置偏差分别指示了喷灌机与引导路径间的相对位姿。路径跟踪的目标是让喷灌机与引导路径间的偏差趋向零, 使其沿着引导路径行走。其控制结构如图 4 所示。

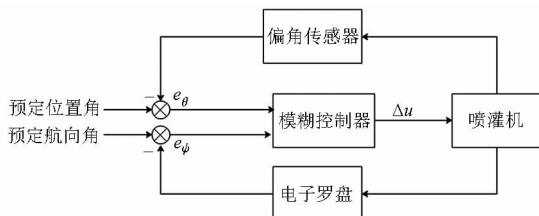


图 4 模糊控制结构图

Fig. 4 Diagram of fuzzy control structure

所构建的二维模糊控制器中输入、输出变量分别选用 7 个语言集作为模糊论域进行描述。所选的 7 个模糊论域为: 正大(PL)、正中(PM)、正小(PS)、零(ZE)、负小(NS)、负中(NM)和负大(NL)。其中喷灌机与预定路径间的位置偏差和航向偏差的基本论域都选取为 $[-30^\circ, 30^\circ]$ 。经计算, 量化因子为 0.1。控制器输出的电动机 PWM 控制变化值 Δu 基本论域选取为 $[-4.5, 4.5]$ 。计算后, 比例因子取 1.5。以喷灌机运行方向为准, 设定喷灌机沿预定路径左偏为正, 右偏为负。输入、输出均选用三角隶属函数进行计算。模糊控制规则的制定以试验所得的经验知识为基础。经多次试验调整, 所得二维模糊控制器的控制规则如表 1 所示。

表 1 模糊控制规则

Tab. 1 Fuzzy control rules

| e_θ | e_ψ | | | | | | |
|------------|----------|----|----|----|----|----|----|
| | NL | NM | NS | ZE | PS | PM | PL |
| NL | PL | PL | PM | PM | PS | ZE | NS |
| NM | PL | PL | PM | PS | ZE | NS | NS |
| NS | PL | PM | PS | PS | NS | NS | NM |
| ZE | PM | PM | PS | ZE | NS | NM | NM |
| PS | PM | PS | PS | NS | NS | NM | NL |
| PM | PS | PS | ZE | NS | NM | NL | NL |
| PL | PS | ZE | NS | NM | NM | NL | NL |

模糊推理方法选用 Mamdani 方法, 根据所制定的模糊控制规则进行模糊推理后便可得到控制输出的模糊量, 再经过反模糊化后便可将模糊量转换为精确量, 计算出所需要的控制输出变量的精确值。系统反模糊化方法采用最大隶属度平均值法进行计算。

模糊控制器的输出量为两侧车轮转速的调节电

压, 导航控制器决策出该控制量后将其发送给从控制器, 从控制器接收到主控制器发送的控制变量后, 根据该控制变量调节喷灌机两侧电动机驱动器的输入调节电压, 同时通过安装在车轮驱动轴上的转速传感器对喷灌机两侧车轮转速进行实时反馈, 实现对驱动电动机转速的精确控制, 从而实现喷灌机预定路线的路径跟踪。本系统中加在电动机驱动器上的电压由两部分组成, 一部分为 u_{const} , 另一部分为导航控制器输出的转速调节电压 Δu , 得到左、右驱动轮的电压分别为:

左电动机驱动电压

$$u_l = u_{const} + \Delta u$$

右电动机驱动电压

$$u_r = u_{const} - \Delta u$$

u_l 、 u_r 作为两侧车轮转速驱动电压的期望值, 与两侧车轮转速传感器构成单位负反馈形成小闭环控制, 通过小闭环对两侧车轮转速的反馈控制可以完全获得两侧车轮转速的状态。

4 试验及结果分析

为测试喷灌机导航控制系统性能, 进行了喷灌机沿导航预定路线跟踪试验。喷灌机在应用时要求在田间留有宽度 50 cm 左右的机行道, 并对其进行水泥平整或其他硬化处理, 由于喷灌机在水泥平整、硬化后的田间机行道运行状况与在水泥路面运行状况相似, 故选择在西北农林科技大学旱区节水农业研究院操场进行渠道式喷灌机自主导航试验。进行自主导航试验前, 在渠道一侧距渠道 1 m 处沿渠道方向拉一条细白线作为参考路径。采用滴水的方式记录喷灌机的行走轨迹。调整喷灌机至起点, 车头对准渠道方向, 开启导航系统后, 滴水式划线器随喷灌机一同沿预定路径行走, 并实时记录喷灌机的真实行走轨迹。将滴水式划线器记录的行走轨迹与预定路线进行比较, 使用卷尺测量两者之间的垂直偏移距离。图 5 为试验场景。

根据机组设计流量和灌溉制度所确定的喷灌机正常作业时的行进速度为 0 ~ 1.0 m/min, 试验时沿路径跟踪方向, 每间隔 30 cm 测量一个点, 如果某测量点处存在轨迹突变, 则用两相邻点距离偏差平均值代替。图 6 为喷灌机以 0.5 m/min 和 1.0 m/min 速度自主导航行驶过程中跟踪偏差随行驶距离变化曲线。

由图 6 可知, 喷灌机导航控制系统可消除侧向偏差, 行进速度为 1 m/min 时喷灌机行驶 6.6 m 可消除侧向偏差, 测试过程中偏差出现负值, 并有一定振荡; 行进速度为 0.5 m/min 时, 偏差稳定减小直至



图5 试验场景

Fig. 5 Test scenario

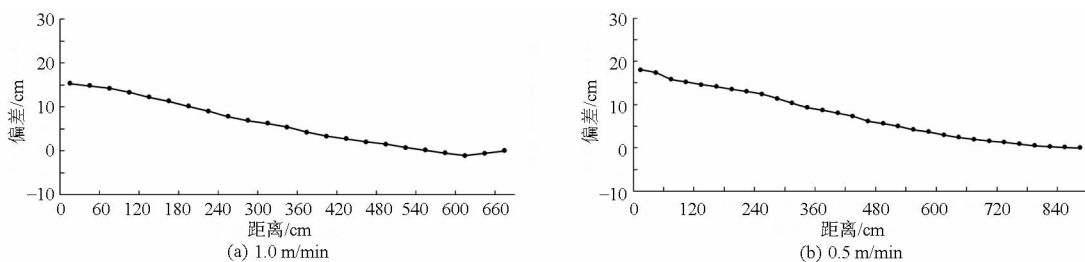


图6 误差变化曲线

Fig. 6 Changing curves of error

0, 并无振荡现象, 但由于行进速度减小, 喷灌机消除误差所行驶距离较长。这表明所设计的喷灌机导航控制系统具有良好的控制精度和稳定性, 能够满足喷灌机自主导航的作业要求。

5 结论

(1) 以电子罗盘和偏角传感器作为导航传感器构建了渠道式喷灌机导航控制系统, 避免了应用 GPS、机器视觉等传感器造成的成本过高问题, 且机构简单、实用性较强、易于推广。

(2) 采用模糊控制算法, 以偏角传感器检测到的位置偏差 e_θ 和电子罗盘检测的航向偏差 e_ψ 为输入量, 输出量为控制两侧电动机转速的 PWM 电压增量 Δu , 构建了渠道式喷灌机进行自主导航的模糊控制器, 实现了喷灌机的自主导航。

(3) 在以 0.5 m/min 和 1.0 m/min 行进速度进行自主导航试验过程中, 喷灌机均可以消除侧向偏差, 基本能够跟踪预定导航路线。导航控制系统具有一定的精度和可靠性, 能够满足喷灌机的使用要求。

参 考 文 献

- REID J F, ZHANG Qin, NOGUCHI Noboru, et al. Agricultural automatic guidance research in North America[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 25(1): 155 - 167.
- DONG F, HEINEMANN W, KASPER R. Development of a row guidance system for an autonomous robot for white asparagus harvesting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 79(2): 216 - 225.
- BENSON E R, REID J F, ZHANG Q. Machine vision-based guidance system for an agricultural small-grain harvester[J]. Transactions of the ASAE, 2003, 46(4): 1255 - 1264.
- 罗锡文, 区颖刚, 赵祚喜, 等. 农用智能移动作业平台模型的研制[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 83 - 85.
LUO Xiwen, OU Yinggang, ZHAO Zuoxi, et al. Research and development of intelligent flexible chassis for precision farming[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(2): 83 - 85. (in Chinese)
- 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, 82.
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, 82. (in Chinese)
- 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)
- 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)
- 周俊, 姬长英, 刘成良. 农用轮式移动机器人视觉导航系统[J]. 农业机械学报, 2005, 36(3): 90 - 94.

- ZHOU Jun, JI Changying, LIU Chengliang. Visual navigation system of agricultural wheeled-mobile robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005,36(3):90-94. (in Chinese)
- 9 周俊, 陈钦, 梁泉. 基于强化学习的农业移动机器人视觉导航[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 53-58.
ZHOU Jun, CHEN Qin, LIANG Quan. Vision navigation of agricultural mobile robot based on reinforcement learning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 53-58. (in Chinese)
- 10 王友权, 周俊, 姬长英, 等. 基于自主导航和全方位转向的农用机器人设计[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 110-113.
WANG Youquan, ZHOU Jun, JI Changying, et al. Design of agricultural wheeled mobile robot based on autonomous navigation and omnidirectional steering[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(7): 110-113. (in Chinese)
- 11 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)
- 12 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)
- 13 李进, 陈无畏, 李碧春, 等. 自动导引车视觉导航的路径识别和跟踪控制[J]. 农业机械学报, 2008, 39(2): 20-24.
LI Jin, CHEN Wuwei, LI Bichun, et al. Road recognition and tracking control of an vision guided AGV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(2): 20-24. (in Chinese)
- 14 陈无畏, 王檀彬, 焦俊, 等. 基于信息融合的多智能体混合体系智能车辆导航[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 1-5.
CHEN Wuwei, WANG Tanbin, JIAO Jun, et al. Design and application for navigation multi-agent of intelligent vehicle based on information fusion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 1-5. (in Chinese)
- 15 PERERA L P, FERRARI V, SANTOS F P, et al. Experimental evaluations on ship autonomous navigation and collision avoidance by intelligent guidance[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2015, 40(2): 374-387.
- 16 张漫, 项明, 魏爽, 等. 玉米中耕除草复合导航系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(增刊): 8-14.
ZHANG Man, XIANG Ming, WEI Shuang, et al. Design and implementation of a corn weeding-cultivating integrated navigation system based on GNSS and MV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(Supp.): 8-14. (in Chinese)
- 17 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)
- 18 朱磊磊, 陈军, 白晓鸽, 等. 基于曲柄滑块机构原理导航的农业机器人设计[J]. 农业机械学报, 2009, 40(增刊): 33-36.
ZHU Leilei, CHEN Jun, BAI Xiaoge, et al. Design of agricultural robot navigated by the slider-crank mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.): 33-36. (in Chinese)
- 19 连世江, 陈军, 贾海政, 等. 基于模糊控制的拖拉机转向跟踪控制研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2009, 37(9): 224-228.
LIAN Shijiang, CHEN Jun, JIA Haizheng, et al. Heading-following control of tractor based on fuzzy control[J]. Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Ed., 2009, 37(9): 224-228. (in Chinese)