

基于多维感知的玉米大田巡检平台设计与试验

班超 董乃希 黄修炼 马悦琦 姜龙腾 迟瑞娟

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 为了提高对大田种植玉米生长动态、干旱胁迫和病虫害等方面的智能巡检监测能力,设计了一种基于多维感知的移动巡检平台。首先,对底盘总成的转向系统、驱动系统和控制系统进行设计,并基于 Arduino UNO 控制器实现了巡检平台的转向及行驶功能。其次,搭建了包括 GNSS/INS(Global navigation satellite system/inertial navigation system)组合导航系统、激光雷达(Light detection and ranging, LiDAR)和工业相机的多维感知系统,对感知系统时间同步方案、数据通信结构和信息采集软件进行设计,实现了巡检平台对环境的感知和数据可视化。最后,在玉米大田对巡检平台进行了底盘行驶性能试验和感知系统环境感知试验。试验结果表明:巡检平台左转平均最小转弯半径为 2 922 mm,右转平均最小转弯半径为 2 736 mm,最大爬坡度大于 26.7%,位置 PID 控制下直线行驶平均速度为 0.523 m/s,与期望速度 0.5 m/s 的误差为 4.6%,行驶 15 m 平均偏移量为 0.636 m,平均偏移率为 4.24 cm/m,满足田间行驶性能要求;感知系统能够在 ROS 系统下稳定采集平台姿态信息、高精度三维点云信息和彩色二维图像信息,实现了巡检平台对玉米大田环境的多维感知。

关键词: 巡检平台; 多维感知; 玉米大田; 点云地图

中图分类号: S224.4; TP242.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)09-0044-09

OSID:



Design and Experiment of Maize Field Inspection Platform Based on Multi-dimensional Perception

BAN Chao DONG Naixi HUANG Xiulian MA Yueqi JIANG Longteng CHI Ruijuan
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: A mobile inspection platform based on multi-dimensional perception was developed to enable intelligent inspection and monitoring of maize growth dynamics, drought stress and diseases in wide fields. Firstly, the chassis assembly's steering system, drive system, and control system were developed, and the steering and driving functions of the inspection platform were implemented, using the Arduino UNO controller. Secondly, a multi-dimensional sensing system that consisted of a global navigation satellite system/inertial navigation system (GNSS/INS) integrated navigation system, light detection and ranging (LiDAR) and camera was constructed. The time synchronization scheme, data communication structure and information acquisition software of the sensing system were then designed to enable the patrol platform to perceive its environment and visualize. Finally, the chassis driving performance test and the perception system environment perception test were performed on the inspection platform in the maize field. According to the test results, the inspection platform's average minimum turning radius for left turns was 2 922 mm, its average minimum turning radius for right turns was 2 736 mm, and its maximum climbing gradient was greater than 26.7%, the average straight-line speed under position PID control was 0.523 m/s, with an error of 4.6% compared with the expected speed of 0.5 m/s, the average deviation for 15 m driving was 0.636 m, and the average deviation rate was 4.24 cm/m, all of which met the field driving performance requirements. Under the ROS system, the sensing system was capable of reliably gathering platform position information, high-precision 3D point cloud information, and color 2D image information, enabling the inspection platform to perceive the surroundings in many dimensions. The research result can be used to guide the intelligent creation of a maize field inspection platform.

Key words: inspection platform; multi-dimensional perception; maize field; point cloud map

收稿日期: 2023-02-17 修回日期: 2023-05-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(52172396)

作者简介: 班超(1996—),男,博士生,主要从事农业机器人导航技术研究,E-mail: banchao@cau.edu.cn

通信作者: 迟瑞娟(1969—),女,副教授,主要从事车辆机电控制及智能化研究,E-mail: chiruijuan@cau.edu.cn

0 引言

随着农业生产方式的革新和农机作业能力的升级,全天候智能巡检移动平台成为无人智慧农业的重要支撑。玉米是保障国家粮食安全的重要大田作物^[1-2],研制适用于玉米大田的智能巡检平台有利于解析作物叶面积^[3-4]等指数,为作物生长动态^[5]、干旱胁迫^[6]和病虫害^[7]等状态做出评估,同时有助于提取作物行距和株距,为植保和收获等环节提供导航辅助^[8]。灵活的移动底盘和多维度的环境感知系统是完成巡检任务的核心技术,直接影响到巡检平台的智能巡检监测能力^[9-10]。

KAYACAN 等^[11]开发了一种在玉米行间冠下的巡检平台,集成全球导航卫星系统(Global navigation satellite system, GNSS)、激光雷达(Light detection and ranging, LiDAR)和视觉等系统,使平台自动行驶于玉米行间并采集玉米生长信息。MUELLER-SIM 等^[12]设计了一种包含航姿参考系统(Attitude and heading reference system, AHRS)、GNSS、LiDAR 和单目相机等传感器的高粱巡检平台,能够对大范围作物进行自动表型实现三维重建。ROURE 等^[13]研制了一种集成 GNSS、AHRS、LiDAR、双目相机和多光谱相机等传感器的葡萄园巡检平台,实现自主导航对作物健康状态进行监测。

目前,国内轨道型巡检平台在煤矿^[14]、工业园^[15]和变电站^[16]等工业领域的应用较为成熟,在预设导轨和射频识别标签的基础上即可较好地完成任务。大田^[17-18]和果园^[19]等农业领域地表不平整且具有土壤保护性的要求,预设导轨等传统方案受到限制^[20],而 GNSS/INS 组合导航方案不能获取平台与作物的相对位置信息,容易在巡检过程中损伤作物。因此,融入点云和图像信息能够为巡检平台自动驾驶提供导航辅助,同时为大田玉米智慧农业决策系统提供丰富的作物及环境参数。

鉴于此,本研究针对玉米大田环境,围绕作物生长动态、干旱胁迫和病虫害等方面的巡检需求,设计一种搭载 GNSS/INS 组合导航系统、激光雷达和工业相机的移动式玉米大田巡检平台,并在田间进行行驶性能试验和环境感知试验。

1 总体方案设计

玉米大田巡检平台由底盘总成和感知系统两部分组成。为适应农田环境的不平整地面,底盘采用基于阿克曼原理的前轮转向、后轮驱动形式。具体地,底盘总成分为转向系统、驱动系统和控制系统3部分。根据感知要求进行传感器选型、时间同步

配置,对信息采集的数据通信及处理软件进行设计。底盘承载感知系统行驶于玉米大田,实现平台对玉米田的智能巡检监测。本平台总体设计框架如图1所示。

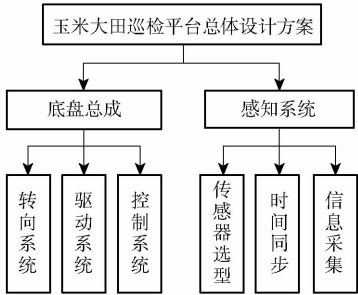


图1 巡检平台总体设计方案

Fig.1 Overall design schematic of inspection platform

2 底盘总成设计

我国等行距种植玉米的行距一般为 50 ~ 60 cm,华北地区实施宽窄行种植技术的玉米宽行行距为 80 ~ 90 cm,为避免巡检平台在工作过程中对玉米作物造成损伤,底盘宽度应小于玉米宽行行距。本次设计的巡检平台面向宽窄行种植技术的玉米,因此底盘宽度选为 60 cm。巡检平台通常以较低速度行驶于不平整的松软路面,应保持良好的转向和直线行驶性能。经过对玉米田环境分析,确定底盘总成按照表1所示的主要参数进行结构设计,总体结构如图2所示。

表1 底盘总成设计参数

Tab.1 Chassis assembly design parameters

参数	数值
长×宽×高/(mm×mm×mm)	800×600×1 100
轮距/mm	500
轴距/mm	550
整备质量/kg	<80
最小转弯半径/mm	3 000
爬坡度/%	>26.7
最小离地间隙/mm	150

2.1 转向系统设计

2.1.1 转向方案与选型

底盘总成转向系统采用阿克曼转向原理,其结构如图3所示,主要由橡胶前轮、前轴、主销、梯形臂、转向电机、丝杆滑台、转向横拉杆、转向直拉杆和转向节臂等组成。转向电机驱动丝杆滑台,带动转向直拉杆、转向横拉杆、梯形臂,从而使橡胶前轮绕主销轴旋转。转向电机选用 57HBP80AL4 型步进电机,丝杆滑台能够在 200 mm 的有效行程内保证 0.03 mm 的移动精度,保证了转向控制的精度。转向前桥在完成转向任务时,需要承载平台重量和车

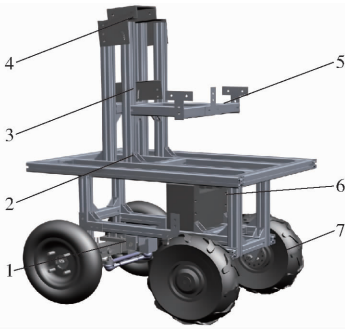


图2 底盘总成结构图

Fig.2 Structural diagram of chassis assembly

1. 转向前桥 2. 接收机安装架 3. 工业相机安装架 4. 激光雷达安装架 5. 上位机放置架 6. 车载电源 7. 驱动后轮

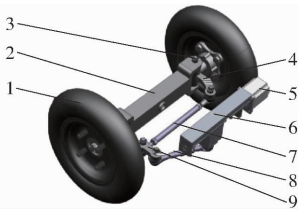


图3 转向系统结构图

Fig.3 Steering system structure diagram

1. 橡胶前轮 2. 前轴 3. 主销 4. 梯形臂 5. 转向电机 6. 丝杆滑台 7. 转向横拉杆 8. 转向直拉杆 9. 转向节臂

轮与地面作用产生的阻力矩^[21]。前桥中的前轴、主销和梯形臂等结构采用碳素钢制造,转向横拉杆和转向直拉杆采用无缝钢管加工,各部件均具有良好的结构强度,能够应对不平整农田地面造成的颠簸与振动。

2.1.2 转向电机性能校核

前轮原地绕主销旋转时受到的阻力矩最大,故选取该工况对转向电机进行校核。前轮转向阻力矩计算式为^[22]

$$M_r = \frac{\mu}{3} \sqrt{\frac{G^3}{p}} \tag{1}$$

式中 M_r ——转向阻力矩, N·m
 μ ——车轮与土壤的静摩擦因数,取 0.7
 G ——巡检平台前桥负荷, N
 p ——轮胎气压, kPa

按照巡检平台最大总质量 80 kg 进行计算,假设质量前后均匀分布,橡胶轮胎气压充至 240 kPa,将数据代入公式(1)可得平台原地转向阻力矩 M_r 为 7.78 N·m。

丝杆传动的推力计算式为

$$F_s = \frac{2\pi\eta T}{L} \tag{2}$$

式中 F_s ——丝杆滑台输出推力, N
 η ——转向电机传动效率,取 0.95
 T ——转向电机输出扭矩, N·m

L ——丝杆螺距, m

已知转向电机额定扭矩为 2 N·m,丝杆螺距 0.005 m,代入公式(2)得输出推力约为 2 387.6 N。转向节臂长度约为 0.14 m,经受力分析可知,对主销处产生的驱动力矩为 334.3 N·m,远远大于阻力矩,满足使用要求。

2.2 驱动系统设计

2.2.1 驱动方案与选型

巡检平台驱动系统采用两后轮驱动,考虑到巡检平台通常以低速行驶于不平整农田地面,驱动轮选择无刷有齿外转子轮毂电机,内含传动比为 1:4.4 的行星齿轮减速结构,可以实现低转速大扭矩输出,具有不发热和运转噪声小等优点,具体参数如表 2 所示。

表 2 轮毂电机参数

Tab.2 Hub motor parameters

参数	数值
额定电压/V	24
额定功率/W	250
额定扭矩/(N·m)	4.5
额定转速/(r·min ⁻¹)	130
质量/kg	5.0
外径/mm	330
胎面宽度/mm	110

轮毂电机的转子布置在轮毂内部,省略了外部的安装空间,仅有长度为 45 mm 的轮轴,分别通过钢板与铝型材车身连接,如图 4 所示。两个轮毂电机分布式驱动,为巡检平台提供动力。转弯时,两侧后轮因转弯半径不同,需要有不同的转速,因此对两后轮进行电子差速控制,以提高巡检平台稳定性和灵活性,同时减轻轮胎磨损。

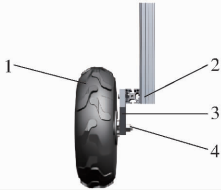


图4 驱动系统结构图

Fig.4 Drive system structure diagram

1. 橡胶后轮及轮毂电机 2. 铝型材车身 3. 钢板 4. 轮轴

2.2.2 轮毂电机性能校核

巡检平台通常处于匀速行驶状态,而且迎风面积很小,可以忽略加速阻力和空气阻力对平台的影响,故本文仅对滚动阻力和坡度阻力进行分析。巡检平台受到的总阻力计算公式为^[23]

$$F = F_p + F_i \tag{3}$$

其中 $F_p = Wf\cos i \tag{4}$

$$F_i = W \sin i \tag{5}$$

式中 F ——巡检平台受到的总阻力,N
 F_p ——巡检平台受到的滚动阻力,N
 F_i ——巡检平台受到的坡度阻力,N
 W ——巡检平台总重,N
 f ——滚动阻力系数
 i ——路面坡度角,(°)

巡检平台受到的滚动阻力是由轮胎和土壤变形产生的,在松软玉米田行驶时较大,参考轮式玉米收获机在工作时的滚动阻力系数,取 $f = 0.1$ ^[24]。另外,适合作物种植的耕地坡度角一般不超过 10°,将参数代入公式(3)~(5)可得巡检平台受到的总阻力为 217.70 N。

所需单个轮毂电机的输出功率为

$$P_e = \frac{F_t v}{2 \eta'} \tag{6}$$

式中 P_e ——轮毂电机输出功率,W
 F_t ——车轮驱动力,N
 v ——巡检平台行驶速度,m/s
 η' ——轮毂电机传动效率,取 0.85

设计巡检平台田间工作时移动速度为 0.5 m/s,代入公式(6)可得所需电机输出功率为 $P_e = 64 \text{ W} < 250 \text{ W}$,说明选择的轮毂电机满足使用需求。

2.3 控制系统设计

2.3.1 控制系统硬件设计

控制系统硬件主要包括控制器、转向电机驱动器、轮毂电机驱动器和遥控手柄模组。控制器是底盘总成的核心,影响巡检平台在行驶过程中的稳定性。选用搭载 ATmega328P 芯片的 Arduino UNO 控制器,其工作电压 5 V,时钟频率为 16 MHz,包含 32 KB Flash 和 14 个数字 I/O 引脚,其中有 6 个引脚可以输出脉宽调制(Pulse width modulation, PWM)信号。控制系统硬件及信号框架如图 5 所示。

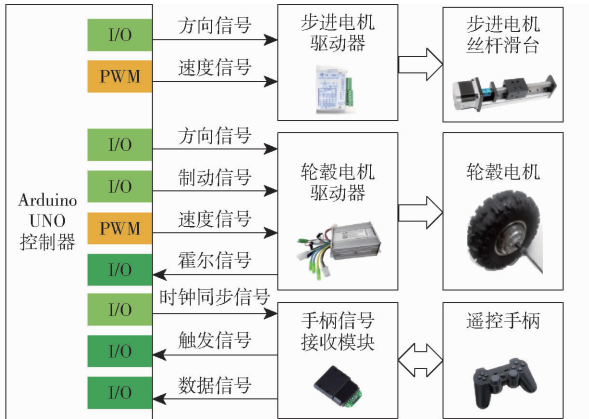


图 5 控制系统硬件及信号框架

为精确控制转向电机,采用恒力矩细分型驱动器,其接收 Arduino UNO 控制器输出的方向信号(DIV)和 PWM 配置的速度信号(PUL),进行功率放大后使转向电机工作。为闭环控制轮毂电机转速,通过两个可以输出霍尔信号的驱动器分别对两个轮毂电机进行控制,根据控制信号使后轮正转、反转或制动。为应对巡检平台特殊或意外行驶工况,采用 2.4 GHz 无线传输遥控手柄模组对巡检平台底盘进行临时接管控制。模组包括手柄信号接收模块和遥控手柄两部分,二者有效传输距离可达到 15 m。手柄信号接收模块与 Arduino UNO 控制器相连,采用 SPI 协议传输遥控手柄按键指令。

2.3.2 控制系统软件设计

使用 Arduino 语言对 Arduino UNO 控制器进行软件设计与开发。基于 ros_lib 库将 Arduino UNO 控制器部署为 ROS 节点,根据 ROS 通讯机制和串口通讯协议,接收上位机路径规划后的运动控制指令,再向转向电机和轮毂电机输出 DIV、PUL 信号。对于转向电机,“左转”对应 DIV 信号为低电平,“右转”为高电平,PUL 模拟数值为 256;对于轮毂电机,“前进”对应 DIV 信号为高电平,“后退”对应 DIV 信号为低电平,PUL 模拟数值根据标定关系确定。

丝杆滑台定位精度和控制器的时钟精度较高,在标定前轮 0°位置的基础上,使用电子量角器测量前轮在设定旋转时间后的偏转角度,拟合出二者关系如图 6 所示,规定前轮 0°位置向左旋转的角度和时间为负,向右为正。根据拟合直线的表达式对转向电机进行控制,旋转角度控制精度优于 1.7°。

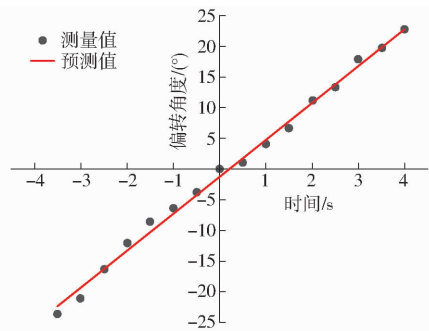


图 6 前轮偏转角度与旋转时间关系曲线

Fig. 6 Curve of relationship between front wheel deflection angle and rotation time

通过调节 PWM 占空比改变轮毂电机平均电压使电机低速转动,在不平整农田地面具有较大扭矩。由于农田地面环境复杂,两个驱动轮与地面的附着力的差异很大,为了提高底盘直线行驶性能,控制器通过霍尔信号之间的时间间隔计算转速,并分别对两个驱动轮使用位置 PID 算法闭环控制转速。仅通过电机厂家提供的参数无法建立电机在工作过程中的

Fig. 5 Control system hardware and signal framework

准确模型,本研究采集轮毂电机实际工作转速,使用 Matlab 的 System Identification 工具箱和 PID Tuner 工具箱整定 PID 参数,得到如图 7 所示的两个驱动后轮动态特性曲线,左轮超调量为 10.1%,右轮超调量 7.6%,且动态响应时间接近。

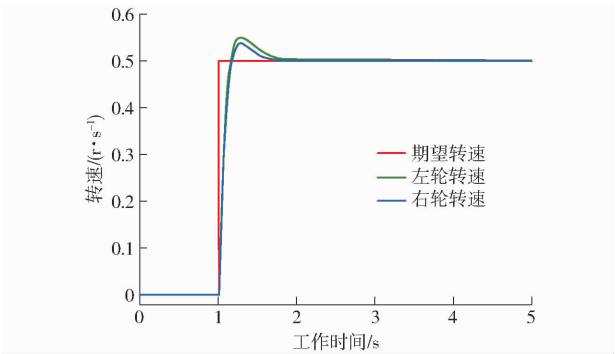


图 7 驱动轮转速动态响应曲线

如果在行驶过程中出现意外工况,可以由遥控手柄接管控制,其软件流程图如图 8 所示,首先对控制器 GPIO 引脚和 SPI 协议进行初始化,等待并解析无线遥控手柄的按键信号,再根据指令向电机驱动器输出控制信号。当控制器解析到手柄按下“前”或“后”的按键信号时,调整轮毂电机驱动器方向信号线的电平状态,并输出指定速度对应的 PUL 信号。当控制器解析到手柄按下“左”或“右”的按键信号时,调整转向电机驱动器方向信号的电平状态,同时输出 PUL 信号使转向电机以最大转速工作。若控制器解析到手柄“停止”按键后,输出信号使转向电机和轮毂电机停止工作。

2.4 侧向稳定性评价

为了降低巡检平台的质心,车载电源、控制器和电机驱动器等都安装在底盘底部;采集系统(激光雷达、相机)质量较轻,安装立柱为密度较小的铝合金材质,对巡检平台质心高度影响较小。侧翻临界角 φ 是评价整机侧向稳定性的重要指标,巡检平台行驶速度低、急转弯工况少,忽略速度和侧向加速度的影响,选取侧翻临界状态进行受力分析,分别对两侧车轮接地点取矩,得到侧翻临界角 φ 的计算公式为^[25]

$$\varphi = \arctan(B/(2H)) \tag{7}$$

式中 B ——巡检平台轮距,m
 H ——巡检平台质心高度,m

根据三维模型得到巡检平台质心高度约为 0.40 m,轮距为 0.50 m,根据式(7)计算得到侧翻临界角为 32.01°,接近 GB 16151.1—2008《农业机械运行安全技术条件 第 1 部分:拖拉机》对拖拉机全挂车运输机组侧翻临界角大于 35°的规定,一般情

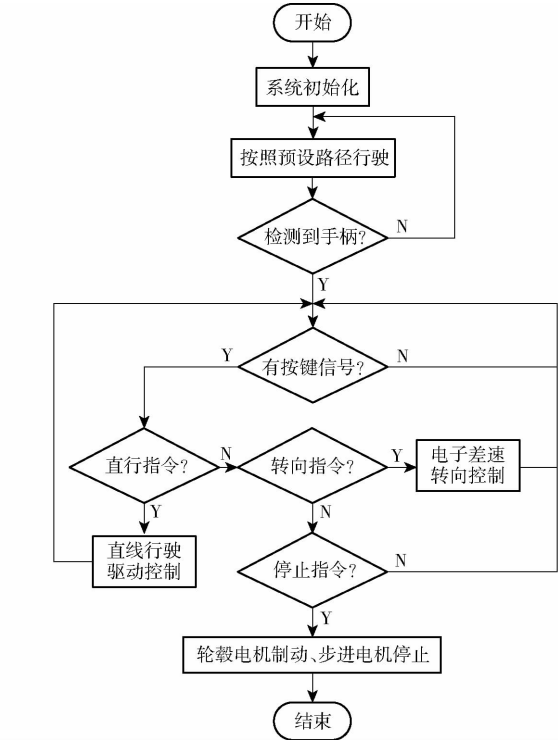


图 8 控制系统软件流程图

Fig. 8 Control system software flow chart

况下,巡检平台在工作过程中不会发生侧翻现象,在复杂崎岖的环境工作时,可在底盘增加配重块以降低整机质心。

3 多维感知系统设计

3.1 传感器选型

高精度位姿信息是巡检平台工作于玉米大田环境的基础,为应对农田不平整路面,选用华测 CGI610 型内置高精度微机电系统(Micro-electromechanical system, MEMS)的 GNSS/INS 组合导航系统,支持多模多频卫星定位技术,能够实时、高频地检测姿态,包括航向角、俯仰角和横滚角。监测玉米株高、行距和株距等信息需要高精度测距传感器,采用速腾聚创 32 线车规级混合固态激光雷达 RS-LiDAR-32 发射的激光获取周围物体距离信息,点云测距精度优于 3 cm。通常利用机器视觉技术识别作物干旱胁迫和病虫害,本文使用支持外部硬件触发的 Basler acA1920-40gc 工业相机配合 Computar V0826-MPZ 镜头采集二维彩色图像。各传感器工作性能稳定,能够应对大田环境中沙尘、花粉和飞虫等自然因素的干扰,主要参数如表 3 所示。

3.2 时间同步方案

各传感器时间同步是非常重要的,如果每个传感器按照自身内部时钟源进行工作,采集到的异构数据之间存在较大时间偏差,不利于多维数据融合感知。虽然在启动时对各传感器同时进行初始化能

表 3 传感器主要参数

Tab.3 Main parameters of sensors

传感器	主要参数/类型
GNSS/INS 组合导航系统 (CGI610 型)	跟踪卫星:GPS、BDS、GLONASS、Galileo、QZSS
	RTK 定位精度:垂直 3 cm、水平 2 cm
	陀螺类型:MEMS
	陀螺仪零偏稳定性:2.5(°)/h
	加速度计零偏稳定性:3.6 μg
激光雷达 (RS-LiDAR-32 型)	数据更新率:100 Hz
	最大距离:200 m
	测距精度:±3 cm
	扫描频率:10 Hz
工业相机 (acA1920-40gc 型)	视角:垂直 40°、水平 360°
	感应芯片:CMOS 型 IMX249
	芯片尺寸:11.33 mm×7.1 mm
	快门类型:Global
	最大分辨率:1 920 像素×1 200 像素
镜头 (V0826-MPZ 型)	芯片尺寸:12.7 mm×9.6 mm
	焦距:8 mm
	视场角:88.8°×76.9°×61.5°
	最小工作距离:100 mm

够在一定程度上对齐时间戳,但是由于各自时钟源存在钟漂,会导致时间戳随着运行时间的增长而发生相互偏离^[26]。

组合导航系统按照地面监控系统维护的高精度原子钟时间进行工作,具有很高的时间精度,而且可以通过 GPRMC 格式报文和秒脉冲信号(Pulse per second, PPS)为其他设备进行授时。设置 CGI610 的 PPS 脉宽为 20 ms,GPRMC 串口波特率为 9 600 b/s,且在 PPS 上升沿 500 ms 内完成,符合 RS-LiDAR-32 激光雷达外部授时要求,其原理如图 9 所示。同时,将 PPS 信号接入一个单独用来触发相机拍摄图像的 Arduino UNO 相机触发器。相机触发器在接收到 PPS 信号后向相机 I/O 口输出 10 Hz 方波信号,实现相机外部硬触发拍照。

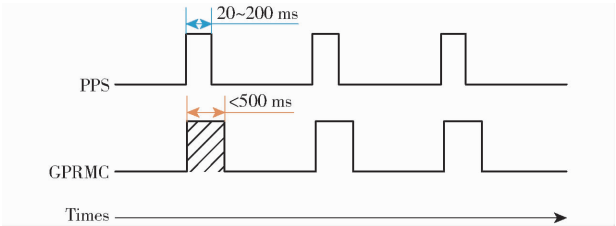


图 9 时间同步原理示意图

Fig.9 Schematic of time synchronization principle

3.3 感知系统信息采集

3.3.1 数据通信结构

上位机、组合导航系统、激光雷达、工业相机及触发器构成感知系统,数据内容和通信结构如图 10 所示。上位机采用便携式计算机(Intel Core i5-

7300 处理器、8 GB DDR4 内存、256 GB 固态硬盘),Ubuntu 20.04 系统安装 ROS Noetic,用于采集、处理和存储传感器数据。受限于 Arduino UNO 控制器的内存空间和计算能力,将组合导航系统经网络差分后的位置信息和姿态信息由 USB 协议传输至上位机,以参与巡检平台路径跟踪的解算。激光雷达接驳盒接入组合导航系统 GRPMC 报文和 PPS 信号,再将激光雷达采集的点云由 RJ45 接口传入上位机,传输过程采用 UDP 协议。工业相机在 10 Hz 频率下拍摄图像时,需要支持巨型帧的千兆以太网进行传输,而选用的上位机仅有一个 RJ45 接口,所以使用 RTL8156 外置网卡将一个 USB3.0 接口转为千兆以太网接口 RJ45,以接收数据。

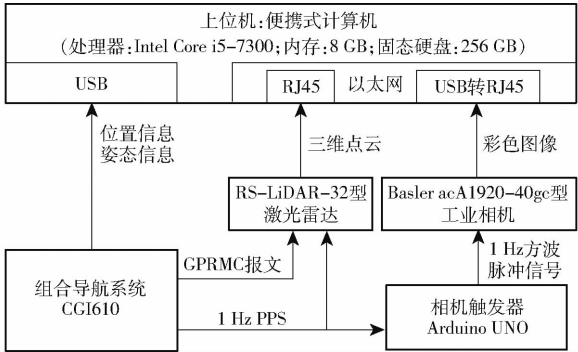


图 10 数据通信示意图

Fig.10 Data communication diagram

3.3.2 信息采集软件

使用 C++ 编程语言编写各传感器的 ROS 功能包,并分别对应一个任务执行节点,由节点控制中心进行维护,以便于对数据进行统一处理。根据 CGI610 输出的报文格式进行字段分割,解析数据中的位置和姿态信息,并分别写入符合 ROS 格式的话题中。对于 RS-LiDAR-32,根据驱动内核 rs_driver 将原始点云数据转换为包含三维坐标、反射强度、扫描线序号和时间戳的 XYZIRT 格式,并调用点云库 PCL 的接口将点云转换为 ROS 消息类型。对于 Basler acA1920-40gc,以 pylon 二次开发组件为基础,基于 OpenCV 库将获取的图像转为 ROS 格式并发布。各传感器节点对应的话题名称及消息类型如表 4 所示。

表 4 各传感器话题信息

Tab.4 Topic information of each sensor

设备节点名称	话题名称	消息类型
gnss_chcnave (CGI610)	/nav_sat_fix	sensor_msgs/NavSatFix
	/imu_raw	sensor_msgs/Imu
	/gps_fix	gps_common/GPSFix
rslidar_node (RS-LiDAR-32)	/rslidar_points	sensor_msgs/PointCloud2
camera_node (acA1920-40gc)	/camera_raw	sensor_msgs/Image

4 田间试验

将上位机、组合导航系统接收机、4G 天线、定位天线、定向天线、激光雷达和工业相机等设备安装于巡检平台底盘总成,巡检平台整备状态如图 11 所示。



图 11 巡检平台整备状态

Fig. 11 Inspection platform readiness

1.4G 天线 2.定位天线 3.上位机 4.激光雷达 5.工业相机及镜头 6.定向天线 7.接收机

4.1 底盘行驶性能试验

4.1.1 转向性能试验

于 2022 年 10 月在中国农业大学上庄实验站(40°08'11" N,116°10'45" E)粗平整后的地面进行最小转弯半径试验。分别将巡检平台前轮向左、向右转到极限位置后,以速度 0.4 ~ 0.7 m/s 自转一圈,在地面形成轮胎运动轨迹,如图 12 所示。测量外侧轨迹中心圆的直径,可以得到单次运动的最小转弯半径。



图 12 最小转弯半径试验现场

Fig. 12 Minimum turning radius test site

由于松软土壤会受到车轮影响发生变形,而且地表不平整会导致测量误差,本次试验重复 5 次并记录试验结果如表 5 所示。求得向左平均最小转弯半径为 2 922 mm,右转平均最小转弯半径为 2 736 mm,在农田环境中具有较好的转向灵活性。

4.1.2 最大爬坡度试验

最大爬坡度是巡检平台田间通过性和动力性的重要考核指标,根据玉米田常见坡度,在农田机耕道边缘堆积 10°和 15°斜坡进行试验,试验现场如图 13 所示。

表 5 最小转弯半径试验结果

Tab. 5 Minimum turning radius test results mm

试验序号	左转弯半径	右转弯半径
1	2 910	2 700
2	2 990	2 685
3	2 905	2 650
4	2 955	2 780
5	2 850	2 865
平均值	2 922	2 736



图 13 最大爬坡度试验现场

Fig. 13 Maximum climbing degree test site

试验过程中,巡检平台能够从坡底的农田行驶至机耕道,而且不发生倾翻现象,表明巡检平台最大爬坡度大于 26.7% (爬坡角 15°),满足设计参数和农田行驶要求。

4.1.3 行驶速度控制精度试验

设定巡检平台目标行驶速度为 0.5 m/s,分别在开环控制和 PID 速度闭环控制模式下行驶,上位机通过串口记录组合导航系统输出的速度信息。分别截取巡检平台在两种控制模式下前 30 s 移动速度,变化过程如图 14 所示,开环控制模式下平均移动速度为 0.587 m/s,误差为 17.4%;PID 速度闭环控制模式下平均速度为 0.523 m/s,误差为 4.6%,表明 PID 闭环控制有效提升了底盘速度控制精度。

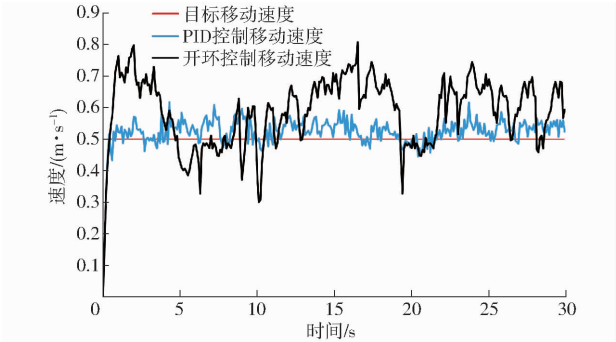


图 14 两种控制模式下移动速度变化曲线

Fig. 14 Movement speed change curves in two control modes

4.1.4 直线行驶试验

选取图 15 所示农田进行直线行驶试验,以拉直的线缆作为参考直线,取 15 m 长度并沿直线撒白面

粉作为标识,在两端地面插入红色标志旗,同时垂直于参考直线放置铝型材,作为巡检平台直线行驶的起止位置标志。巡检平台前方固定一个装有白面粉的塑料瓶,使其在行驶过程中撒落面粉形成运动轨迹。设定两个红旗的位置分别为点 A、B,量取距离点 A、B 各 60 cm 的两点 A'和 B'作为巡检平台直线行驶的起止点,直线 A'B'为导航线。

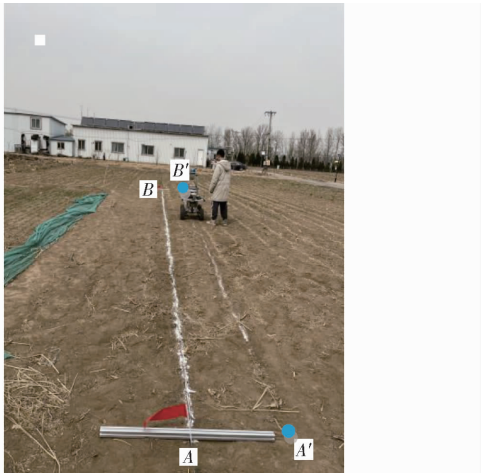


图 15 直线行驶试验场地

Fig. 15 Scene of driven along straight line

使巡检平台在 PID 控制模式下沿导航线行驶后,测量运动轨迹终点到参考直线的横向偏移量,重复 5 次试验得 0.603、0.726、0.652、0.585、0.613 m。结果显示,巡检平台直线行驶 15 m 时,平均偏移量为 0.636 m,单位距离平均偏移率为 4.24 cm/m,偏移率较小。

4.2 感知系统环境感知试验

4.2.1 传感器数据采集试验

于 2022 年 10 月在中国农业大学上庄实验站(40°07'57" N,116°10'40"E)进行感知系统传感器数据采集试验。启动感知系统各传感器 ROS 功能包后,可以在图 16 所示的界面实时显示环境感知数据,包括组合导航系统串口输出的融合位姿信

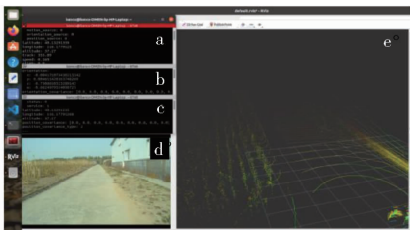


图 16 RVIZ 可视化界面

Fig. 16 RVIZ visualization interface

息(a)、MEMS 原始数据(b)、卫星定位数据(c)、RVIZ 工具调取的相机图像(d)和激光雷达点云(e)信息。

4.2.2 三维点云建图试验

试验环境中玉米作物的果实已经收获,植株和叶片干枯,但是依然保持原行距和株距立于玉米田中。根据 A-LOAM 算法对玉米田间道路环境进行建图,利用数据集中前 10 s 点云数据(100 帧)的建图结果如图 17 所示。可以清晰地看出巡检平台周围的玉米植株生长高度(a)及作物行(b),也可以根据长条状无点云区域(c)分辨出机耕道旁的灌溉渠。

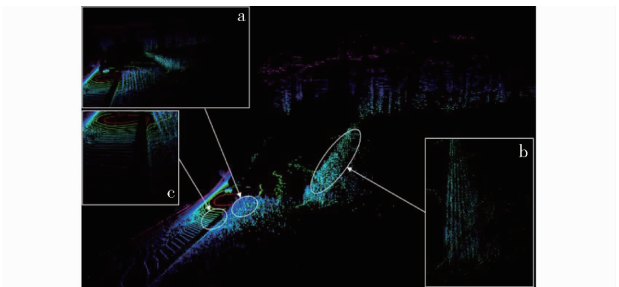


图 17 三维点云地图

Fig. 17 3D point cloud map

5 结论

(1)设计了一种用于玉米大田的移动巡检平台。该平台以 Arduino UNO 控制器协调转向系统和驱动系统完成田间运动,搭载了包括上位机、GNSS/INS 组合导航系统、激光雷达和工业相机的多维感知系统。

(2)田间行驶性能试验表明:左转平均最小转弯半径为 2 922 mm,右转平均最小转弯半径为 2 736 mm,转弯路径无偏移现象,转向可靠;最大爬坡度大于 26.7%,动力性和通过性满足一般行驶条件;PID 控制下平均行驶速度为 0.523 m/s,与期望速度 0.5 m/s 的误差为 4.6%;直线行驶 15 m 的平均偏移量为 0.636 m,单位行驶距离平均偏移率为 4.24 cm/m,偏移率较小。

(3)环境感知试验表明:感知系统数据通信和数据采集软件有效,能够将各传感器数据可视化显示和保存。根据 100 帧激光点云数据建立的玉米田三维点云地图可以较好地反映出玉米植株生长高度、行距、株距和沟渠等环境特征。

参 考 文 献

[1] 梁秀英,周风燃,陈欢,等. 基于运动恢复结构的玉米植株三维重建与性状提取[J]. 农业机械学报,2020,51(6):209-219. LIANG Xiuying,ZHOU Fengran,CHEN Huan,et al. Three-dimensional maize plants reconstruction and traits extraction based on structure from motion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 209-219. (in Chinese)

- [2] 李鹏, 劳彩莲, 杨瀚, 等. 基于移动机器人平台的玉米植株三维信息采集系统[J]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊): 15–21.
LI Peng, LAO Cailian, YANG Han, et al. Maize plant 3D information acquisition system based on mobile robot platform[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 15–21. (in Chinese)
- [3] QIU Ruicheng, WEI Shuang, ZHANG Man, et al. Sensors for measuring plant phenotyping: a review[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(2): 1–17.
- [4] 张漫, 苗艳龙, 仇瑞承, 等. 基于车载三维激光雷达的玉米叶面积指数测量[J]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 12–21.
ZHANG Man, MIAO Yanlong, QIU Ruicheng, et al. Maize leaf area index measurement based on vehicle 3D LiDAR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 12–21. (in Chinese)
- [5] WANG Cheng, NIE Sheng, XI Xiaohuan, et al. Estimating the biomass of maize with hyperspectral and LiDAR data[J]. Remote Sensing, 2017, 9(1): 11.
- [6] QIU Ruicheng, MIAO Yanlong, ZHANG Man, et al. Detection of the 3D temperature characteristics of maize under water stress using thermal and RGB–D cameras[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 191: 106551.
- [7] MAHALAKSHMI S D, VIJAYALAKSHMI K. Agro suraksha: pest and disease detection for corn field using image analysis[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2021, 12: 7375–7389.
- [8] 张漫, 季宇寒, 李世超, 等. 农业机械导航技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 1–18.
ZHANG Man, JI Yuhua, LI Shichao, et al. Research progress of agricultural machinery navigation technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 1–18. (in Chinese)
- [9] 李道亮, 李震. 无人农场系统分析与发展展望[J]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 1–12.
LI Daoliang, LI Zhen. System analysis and development prospect of unmanned farming[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 1–12. (in Chinese)
- [10] 刘成良, 贡亮, 苑进, 等. 农业机器人关键技术研究现状与发展趋势[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 1–22, 55.
LIU Chengliang, GONG Liang, YUAN Jin, et al. Current status and development trends of agricultural robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 1–22, 55. (in Chinese)
- [11] KAYACAN E, YOUNG S N, PESCHEL J M, et al. High precision control of tracked field robots in the presence of unknown traction coefficients[J]. Journal of Field Robotics, 2018, 35: 1050–1062.
- [12] MUELLER-SIM T, JENKINS M, ABEL J, et al. The robotanist: a ground-based agricultural robot for high-throughput crop phenotyping[C]//2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2017: 3634–3639.
- [13] ROURE F, MORENO G, SOLER M, et al. Grape: ground robot for vineyard monitoring and protection[C]// Iberian Robotics Conference, 2018: 249–261.
- [14] 杨春雨, 张鑫. 煤矿机器人环境感知与路径规划关键技术[J]. 煤炭学报, 2022, 47(7): 2844–2872.
YANG Chunyu, ZHANG Xin. Key technologies of coal mine robots for environment perception and path planning[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(7): 2844–2872. (in Chinese)
- [15] 邓军, 李钊, 王伟峰, 等. 基于改进 ILS–RVND 算法的工业园区智能巡检机器人路径规划方法[J]. 现代电子技术, 2021, 44(18): 167–171.
DENG Jun, LI Zhao, WANG Weifeng, et al. Improved ILS–RVND algorithm based path planning method of intelligent inspection robot in industrial park[J]. Modern Electronics Technique, 2021, 44(18): 167–171. (in Chinese)
- [16] 张春晓, 陆志浩, 刘相财. 智慧变电站联合巡检技术及其应用[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(9): 158–164.
ZHANG Chunxiao, LU Zhihao, LIU Xiangcai. Joint inspection technology and its application in a smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 158–164. (in Chinese)
- [17] 陈治龙. 保护性耕作模式下玉米巡检车底盘运动控制系统设计与试验[D]. 长春: 吉林农业大学, 2022.
CHEN Zhilong. Design and test of chassis motion control system for corn inspection vehicle in conservation tillage mode[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [18] 梁栋, 胡丽娜, 王秀, 等. 车载式大田土壤电导率在线检测系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 274–285.
LIANG Dong, HU Lina, WANG Xiu, et al. Design and experiment of vehicle-mounted field soil electrical conductivity online detection system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 274–285. (in Chinese)
- [19] 王毅, 何宇, 王恺, 等. 巡检机器人获取柑橘树上果实完整表面信息方法研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 232–240.
WANG Yi, HE Yu, WANG Kai, et al. Method of getting complete surface information of citrus by inspection robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 232–240. (in Chinese)
- [20] 季宇寒, 李寒, 张漫, 等. 基于激光雷达的巡检机器人导航系统研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 14–21.
JI Yuhua, LI Han, ZHANG Man, et al. Navigation system for inspection robot based on LiDAR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 14–21. (in Chinese)
- [21] 孙慧. 园艺拖拉机大转向角转向机构优化设计研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2020.
SUN Hui. Research on optimal design of large steering angle steering mechanism of garden tractor[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [22] 刘竞一, 汪随风, 周建文. 原地转向阻力矩计算优化和试验验证[J]. 拖拉机与农用运输车, 2016, 43(6): 14–18, 23.
LIU Jingyi, WANG Suifeng, ZHOU Jianwen. Calculation optimization and test validation of pivot steering resistance torque[J]. Tractor & Farm Transporter, 2016, 43(6): 14–18, 23. (in Chinese)

- [7] 贾江鸣, 叶玉泽, 程培林, 等. 细长果蔬采摘软体气动抓手设计与参数优化[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 26–34.
JIA Jiangming, YE Yuze, CHENG Peilin, et al. Design and parameter optimization of soft pneumatic gripper for slender fruits and vegetables picking[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 26–34. (in Chinese)
- [8] 费燕琼, 庞武, 于文博. 气压驱动软体机器人运动研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(13): 14–18.
FEI Yanqiong, PANG Wu, YU Wenbo. Movement of air-driven soft robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(13): 14–18. (in Chinese)
- [9] LAWRENCE A B, ALSPACH A N, BENTIVEGNA D C. Mechanical implementation of a variable-stiffness actuator for a softly strummed ukulele[C] // 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2016: 376–382.
- [10] MAZZEO A D, HARDT D E. Centrifugal casting of microfluidic components with PDMS[J]. Journal of Micro and Nano-Manufacturing, 2013, 1(2): 021001.
- [11] TOLLEY M T, SHEPHERD R F, MOSADEGH B, et al. A resilient, untethered soft robot[J]. Soft Robotics, 2014, 1(3): 213–223.
- [12] MARCHESE A D, KATZSCHMANN R K, RUS D. Whole arm planning for a soft and highly compliant 2d robotic manipulator[C] // 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2014), 2014: 554–560.
- [13] DAERDEN F, LEFEBER D. Pneumatic artificial muscles: actuators for robotics and automation[J]. European Journal of Mechanical and Environmental Engineering, 2002, 47: 11–21.
- [14] ONAL C D, RUS D. Autonomous undulatory serpentine locomotion utilizing body dynamics of a fluidic soft robot[J]. Bioinspiration Biomimetics, 2013, 8(2): 026003.
- [15] MARCHESE A D, KATZSCHMANN R K, RUS D. A recipe for soft fluidic elastomer robots[J]. Soft Robotics, 2015, 2(1): 7–25.
- [16] ZHANG Y, ZHANG N, HINGORANI H, et al. Fast-response, stiffness-tunable soft actuator by hybrid multimaterial 3D printing[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29: 1806698.
- [17] ZHUANG Y, GUO Y, LI J, et al. Preparation and laser sintering of a thermoplastic polyurethane carbon nanotube composite-based pressure sensor[J]. RSC Advances, 2020, 10: 23644–23652.
- [18] ANVER H M, MUTLU R, ALICI G. 3D printing of a thin-wall soft and monolithic gripper using fused filament fabrication[C] // 2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2017: 442–447.
- [19] HONG K Y, HUI Y N, YEOW C H. High-force soft printable pneumatics for soft robotic applications[J]. Soft Robotics, 2016, 3(3): 144–158.
- [20] PEELE B N, WALLIN T J, ZHAO H, et al. 3D printing antagonistic systems of artificial muscle using projection stereolithography[J]. Bioinspiration Biomimetics, 2015, 10(5): 055003.
- [21] VALENTINE A D, BUSBEE T A, BOLEY J W, et al. Hybrid 3D printing of soft electronics[J]. Advanced Materials, 2017, 29(40): 1703817.
- [22] MORROW J, HEMLEBEN S, MENGUC Y. Directly fabricating soft robotic actuators with an open-source 3D printer[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2017, 2(1): 277–281.
- [23] WALLIN T J, PIKUL J H, BODKHE S, et al. Click chemistry stereolithography for soft robots that self-heal[J]. Journal of Materials Chemistry B, 2017, 5(31): 6249–6255.
- [24] ZIRAK N, SHIRINBAYAN M, BENFRIHA K, et al. Stereolithography of (meth) acrylate-based photocurable resin: thermal and mechanical properties[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2022, 139(22): 1–11.

(上接第 52 页)

- [23] 孟庆华, 许进, 王东峰. 轮毂电机驱动型电动汽车动力系统研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 33–37, 20.
MENG Qinghua, XU Jin, WANG Dongfeng. Power system of electric vehicle driven by in-wheel motors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 33–37, 20. (in Chinese)
- [24] 杜岳峰. 丘陵山地自走式玉米收获机设计方法与试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
DU Yuefeng. Design method and experimental research on self-propelled corn harvester for hilly and mountainous region[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [25] 秦嘉浩, 刘海帆, SUH C S, 等. 拖拉机动量飞轮主动防侧翻控制与模型试验研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 2): 515–520.
QIN Jiahao, LIU Haifan, SUH C S, et al. Tractor active anti-rollover control using momentum flywheel with experimental verification[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 515–520. (in Chinese)
- [26] 张晶威, 刘铁军, 李仁刚, 等. 自动驾驶多传感器融合的时间校准方法研究[J]. 汽车工程, 2022, 44(2): 215–224.
ZHANG Jingwei, LIU Tiejun, LI Ren'gang, et al. A temporal calibration method for multi-sensor fusion of autonomous vehicles[J]. Automotive Engineering, 2022, 44(2): 215–224. (in Chinese)