

耕作机具耕深在线测量装置设计与试验

田光兆¹ 胡涛¹ 王文彬² 李宗正¹ 杨浩勇³ 丁永前⁴ 邱威¹

(1. 南京农业大学工学院, 南京 211800; 2. 盐城市粮油作物技术指导站, 盐城 224001;

3. 江苏省农业机械试验鉴定站, 南京 210017; 4. 南京农业大学人工智能学院, 南京 211800)

摘要: 耕深是评价耕作机具作业质量的重要指标, 针对人工耕深测量存在误差大、效率低、无法在线监测等问题, 本文设计了一种具备通用性的耕深在线测量装置。通过激光测距传感器与九轴姿态传感器协同采集耕作机具动态作业数据, 结合高斯滤波与卡尔曼滤波算法实现数据降噪与融合, 实时在线计算耕深数据, 并通过 LoRa 数传电台将数据实时回传到操作终端显示并存储, 经土槽平台试验验证了方案可行性。试验结果表明, 静态测试中, 加权融合数据与人工测量数据对比, 误差最大值为 0.43 cm, 误差平均值为 0.26 cm, 均方根误差为 0.24 cm; 在预定耕深为 8、12、15 cm 的动态测量中, 最大偏差为 1.63、1.80、1.18 cm, 耕深变异系数为 6.37%、5.28% 和 2.68%。研究结果表明, 本装置可提高农机试验鉴定效率、精度与信息化程度。

关键词: 耕作机具; 耕深测量; 激光测距; 数据融合

中图分类号: S237

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)02-0012-07

OSID:



Design and Experiment of Online Tillage Depth Measurement Device for Tillage Implements

TIAN Guangzhao¹ HU Tao¹ WANG Wenbin² LI Zongzheng¹ YANG Haoyong³ DING Yongqian⁴ QIU Wei¹

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 211800, China

2. Yancheng Grain and Oil Crop Technology Guidance Station, Yancheng 224001, China

3. Jiangsu Agricultural Machinery Testing and Appraisal Station, Nanjing 210017, China

4. College of Artificial Intelligence, Nanjing Agricultural University, Nanjing 211800, China)

Abstract: Tillage depth is a critical parameter for evaluating the performance of agricultural tillage equipment. To overcome the limitations of manual measurement methods, including high error rates, low efficiency, and the lack of real-time monitoring, a universal online tillage depth measurement system was presented. The system integrated a laser distance sensor with a nine-axis attitude sensor to dynamically capture operational data from tillage tools. Utilizing Gaussian and Kalman filtering algorithms, the system effectively reduced noise and fuses data, enabling real-time calculation of tillage depth. The results were transmitted wirelessly via LoRa to an operator terminal for display, storage, and analysis. Comprehensive soil bin experiments were conducted to validate the system's performance. In static tests, the weighted fusion data demonstrated a maximum error of 0.43 cm, an average error of 0.26 cm, and a root mean square error of 0.24 cm when compared with results of manual measurements. Dynamic tests with target depths of 8 cm, 12 cm, and 15 cm yielded maximum deviations of 1.63 cm, 1.80 cm, and 1.18 cm, respectively, with corresponding depth variation coefficients of 6.37%, 5.28%, and 2.68%. These results confirmed the system's ability to significantly enhance the efficiency, accuracy, and digitalization of agricultural machinery testing. The proposed system provided a reliable, real-time monitoring solution for precision agriculture, reducing reliance on manual methods and improving operational transparency. Its adaptability to various tillage conditions and high measurement reliability make it a valuable tool for advancing agricultural mechanization and smart farming practices.

Key words: tillage implements; tillage depth measurement; laser ranging; data fusion

收稿日期: 2025-06-02 修回日期: 2025-08-02

基金项目: 江苏省现代农机装备与技术示范推广项目(NJ2024-10)

作者简介: 田光兆(1983—), 男, 副教授, 博士, 主要从事农机智能化检测研究, E-mail: tgz@njau.edu.cn

通信作者: 邱威(1984—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事智能植保装备研究, E-mail: qiuwei@njau.edu.cn

0 引言

随着农业机械市场的扩大,需要对农业机械设备进行产品质量、技术状态检测。因此设计具有稳定性、可靠性的农业机械试验鉴定装备,对促进农机产品升级具有重要意义^[1]。耕作深度是评估耕作机具作业质量的关键技术标准,合适的耕作深度对于农作物根系生长有重要影响^[2]。耕深是耕作后土壤犁沟底部与土壤地表的垂直距离,与耕作机械性能直接相关^[3]。

耕深测量,最初采用人工测量方法,通过使用铁棍、耕深尺等测量工具进行采样,只能得到基于采样点的离散数据,耕深连续变化情况无法获得^[4]。近年来,有不少学者提出了能够应用的耕深测量办法^[5-11]。李青龙等^[12]通过利用安装在仿形地轮上角度传感器的数值变化得出实时耕深。商高等^[13]探讨耕深直接测量方法和间接测量方法结合的误差修正办法,使用线性拟合方法修正间接误差。杜新武等^[14]根据旋耕机悬挂姿态进行耕深关系模型建立,通过下拉杆与机架之间水平倾角反映耕深变化,并设计了配套的监测系统评估耕深质量。文献^[15-18]重点开展了耕深关系模型研究,取得了一系列进展。但目前耕深测量装置,大多针对某一特定型号的耕作机具,无法直接用于农机试验鉴定。

随着物联网技术在农业中的快速应用^[19],农机具试验鉴定环节对信息化要求日益增强。本文设计一套具备通用性在线耕深测量装置,用于农机试验鉴定,以期提高耕深测量效率和精度。

1 耕深测量装置工作原理

采用 2 套激光测距传感器分别安装在耕作机具左右两侧,分别检测耕作机具左右两侧在工作前后相对土壤表面的高度差,进而获得两侧耕深。考虑到部分型号耕作机具结构狭窄,无法找到既能够竖直向下测量又不受泥土飞溅影响的测量位置,本文采用姿态传感器进行辅助测量,如图 1 所示。将姿态传感器紧贴激光测距传感器表面,获得激光测距传感器俯仰角 α ,并对激光测距传感器测量的 L 进行修正,最终获得测量装置距土壤表面的实际高度 H 为

$$H = L \sin \alpha \quad (1)$$

实际工作时,将根据实际高度发生的变化,计算真实耕深。

实际耕深测量方案为:耕作机具在未工作状态下,拖拉机驾驶人员控制后置式三点悬挂装置进行耕作机具姿态调整,直到耕作机具刀头与土壤表层

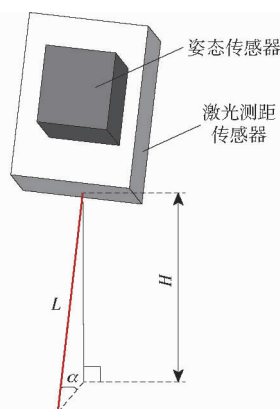


图 1 测量方案原理

Fig. 1 Theoretical basis for measurement scheme

恰好接触而并未陷入状态,记为初始状态,如图 2 所示。记录此时耕深测量装置数据,计算出耕深测量装置离地间隙 H_0 ,计算式为

$$H_0 = L_0 \sin \alpha_0 \quad (2)$$

式中 L_0 ——初始状态下激光测距传感器测量数据, cm

α_0 ——初始状态下姿态传感器俯仰角, ($^\circ$)

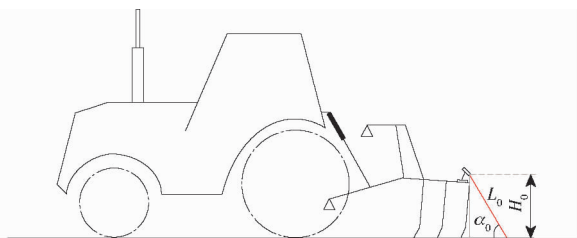


图 2 初始状态

Fig. 2 Initial state

耕作机具在性能检测或实际作业中,计算耕深测量装置离地间隙 H_1 需考虑激光测距传感器测量数据 L_1 和姿态传感器测量俯仰角 α_1 ,如图 3 所示,即耕深 ΔH 计算式为

$$\Delta H = H_0 - H_1 = L_0 \sin \alpha_0 - L_1 \sin \alpha_1 \quad (3)$$

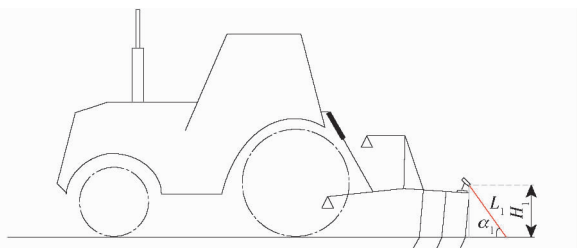


图 3 水平面工作状态

Fig. 3 Horizontal plane state

该方案适用于大多数土槽试验鉴定。考虑更复杂的情况,即斜坡场景耕地作业,如图 4 所示。此时俯仰角包含地面坡度信息,因此需通过安装在拖拉机驾驶舱上的姿态传感器进行校正。计算耕深测量装置离地间隙 H_2 需要结合拖拉机俯仰角 α'_2 、激光测距传感器测量数据 L_2 和姿态传感器测量俯仰角 α_2 ,即

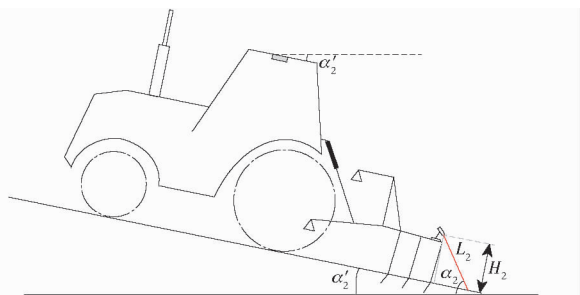


图4 斜坡工作状态

Fig. 4 Slope state

$$\Delta H = H_0 - H_2 = L_0 \sin \alpha_0 - L_2 \sin(\alpha_2 - \alpha_2') \quad (4)$$

同样地,在初始状态下,拖拉机也存在一定的俯仰角 α_0' ,且工作时处于斜坡状态,则耕深 ΔH 计算式为

$$\Delta H = H_0 - H_2 = L_0 \sin(\alpha_0 - \alpha_0') - L_2 \sin(\alpha_2 - \alpha_2') \quad (5)$$

2 耕深测量装置总体结构

耕深测量装置由安装在耕作机具上的测量单元、数据无线传输装置与管理端3部分构成,如图5所示。测量单元主要包含2套激光测距传感器和2套姿态传感器。数据无线传输装置主要由2套LoRa无线数传电台、1套5GHz工业路由器组成。管理端主要由1台触摸式工控机和测控软件组成。

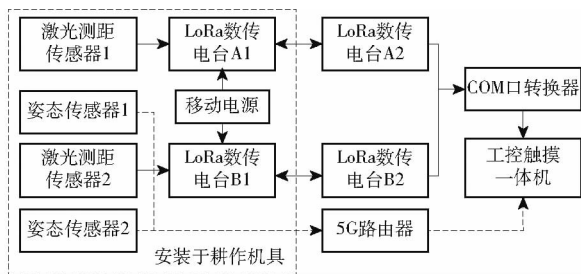


图5 系统总体结构

Fig. 5 Overall system structure

工作过程中,激光测距传感器通过LoRa无线数传电台实现现场测量数据传输,并通过串口转换器将距离信息传输至工控触摸一体机上。姿态传感器与工控触摸一体机之间通过5G路由器实现服务器与客户端无线连接,并将姿态信息向工控机实时发送。

3 硬件设计

3.1 传感器选型

依据场景需求,采用激光测距传感器采集距离信息,采用九轴姿态传感器采集角度信息。工作时将各传感器布置在耕作机组机身和悬挂耕作机具上。传感器参数如表1所示。

表1 传感器参数

Tab. 1 Parameters of sensors

参数	激光测距传感器	九轴姿态传感器
量程	0.05 ~ 80 m	-180° ~ 180°(X轴) -90° ~ 90°(Y轴)
测量精度	0.1 mm	0.2°
工作温度/°C	-10 ~ 60	-10 ~ 60

3.2 试制样机

采用万向磁力底座配合两段式万向节结构,将传感器安装在耕作机具上。通过4个强磁底座固定包含供电单元、数传电台的箱体。测量时,传感器测量数据通过数传电台、无线网络与操作端进行通信。耕深测量系统样机如图6所示。



(a) 测量单元



(b) 管理端



(c) 箱体底部



(d) 传感器安装

图6 耕深测量系统样机

Fig. 6 Prototype of tillage depth measuring device

4 软件设计与数据处理

4.1 操作端测量软件开发

采用Python 3.8和PyQt5设计了操作端数据采集应用程序,可实时查看耕深,并对系统进行操作,部分界面如图7所示。

4.2 激光测距传感器数据处理

耕作机具工作中会产生抖动,使传感器易出现噪声导致测量不准确。因此,需要对传感器数据进行处理与分析,包含滤波处理和数据融合,以获得更加符合实际的耕深连续测量值。

采用高斯滤波处理激光测距传感器数据^[20-22]。在特定场景,如耕地作业中,环境噪声来源固定,激光测距传感器采集的数据由于振动通常在一个稳定

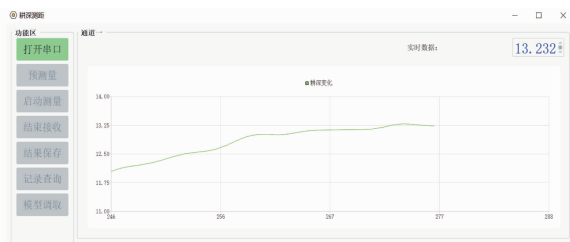


图 7 数据采集界面

Fig. 7 Data collection interface

值附近波动,因此把某一时刻激光测距传感器数值看作是一个概率问题。记传感器采集值为 X , 随机变量 X 密度函数为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (-\infty < x < +\infty) \quad (6)$$

$$\text{其中 } \sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2 \quad \mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

视作 X 服从参数为 μ 和 σ^2 的高斯分布, 记作 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$, 即

$$p_1 \leq \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \leq 1 \quad (7)$$

式(7)中, p_1 为临界点。当 p_1 大于高斯分布函数值时, 即认为测量值为小概率发生值; 相反, 则认为测量值为大概率发生值。

对式(7)简化后进行两边取对数、开方等操作, 得到置信区间为

$$\sqrt{-2\sigma^2 \ln(\sqrt{2\pi}\sigma)} + \mu \leq X \leq \sqrt{-2\sigma^2 \ln(\sqrt{2\pi}\sigma p_1)} + \mu \quad (8)$$

由式(8)可知, 置信区间范围即 X 范围区间。选取不同窗宽和标准差对原始数据进行处理。图 8 为高斯窗宽为 15、标准差为 2.5 条件下的高斯滤波处理示意图。

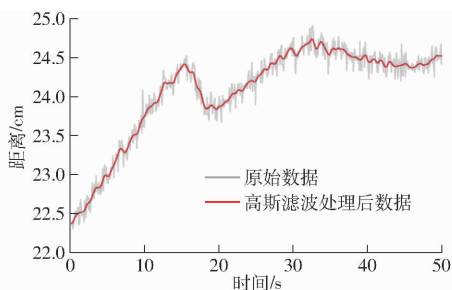


图 8 高斯滤波处理结果

Fig. 8 Gaussian filtering processing results

4.3 姿态传感器数据处理

采用卡尔曼滤波算法^[23-28]处理九轴姿态传感器中陀螺仪、加速度计和磁力计采集的三轴角速度、加速度和磁场数据。

卡尔曼滤波算法流程为:

(1) 确定初始化参数, 当 $k = 1$ 时, 通过静止状

态下测量三轴加速度计数据和三轴磁场数据, 解算初始横滚角、俯仰角和偏航角。

(2) 在 $k + 1$ 时刻, 由当前时刻三轴角度同前时刻陀螺仪数据求解先验误差协方差 P , 其中前时刻三轴角度由陀螺仪采集的三轴角速度数据预测。

(3) 根据卡尔曼滤波增益矩阵式计算卡尔曼滤波增益。

(4) 基于状态更新方程, 利用 $k + 1$ 时刻加速度计和磁力计测量数据得到的姿态角作为观测值, 以更新预测值。

(5) 计算 $k + 2$ 时刻预测值, 利用 $k + 2$ 时刻陀螺仪采集的三轴角速度数据, 求解四元数微分方程, 解算出当前时刻姿态角度作为预测值。重复(3)、(4) 2 个步骤, 不断地机械能递归迭代, 最终得到姿态角最优估计值。

为了验证卡尔曼融合滤波算法姿态解算效果, 在试验室内模拟抖动, 采集九轴姿态传感器陀螺仪、加速度计与磁力计的各项信息数据, 选取其中 1 000 个点位进行效果比对, 采集频率为 20 Hz。对采集的数据进行卡尔曼融合滤波算法处理, 将处理后角度与原始数据进行对比。图 9 为横滚角观测值和滤波处理后结果对比。

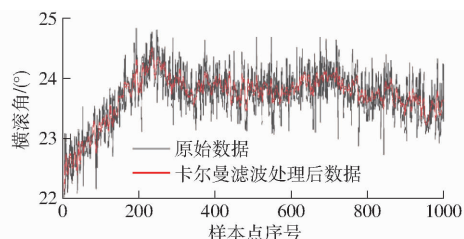


图 9 横滚角融合效果对比

Fig. 9 Comparison of roll angle fusion effects

5 试验与结果分析

为了检测耕深测量装置测量数据准确性, 在土槽试验平台上对耕深测量装置进行静态测试, 如图 10 所示。测试前, 对土槽试验平台土面进行一次翻耕, 并且用镇压轮将土面压实平整, 土壤含水率为 8%。



图 10 土槽试验平台

Fig. 10 Soil trough testing platform

静态测试过程中将耕深测量装置安装在耕作机

具合适的位置,通过调整耕作机具姿态改变离地间隙。将耕深测量装置测量离地间隙与人工测量离地间隙进行对比,其偏差体现测量装置精度。

对 2 组耕深测量装置的离地间隙进行加权融合,即

$$x = \lambda_1 x_1 + \lambda_2 x_2 \quad (9)$$

式中 x_1, x_2 ——第 1、2 组耕深测量数据

λ_1, λ_2 ——第 1、2 组权重,取 $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.5$

静态测试结果如表 2 所示,在经过镇压平整土面 2 组装置数据误差最大值为 0.29 cm,误差平均值为 0.18 cm,均方根误差为 0.10 cm。2 组装置测量数据与人工测量数据之间略有误差,其主要原因为激光测距传感器落点与人工测量位置选点不一致,耕整后土面也非完全平整,误差在允许范围内。

表 2 耕深测量装置静态测量结果

Tab. 2 Static measurement data of tillage depth measuring device

左侧人工		右侧人工		加权融合
测量距离	第 1 组装置数据	测量距离	第 2 组装置数据	数据
10.4	10.54	10.4	10.70	10.62
11.4	11.60	11.6	11.44	11.52
12.3	12.63	12.5	12.55	12.59
15.6	15.83	15.7	16.05	15.94

为了检测耕深测量装置动态性能,将装置安装在兴安机械生产的 2BFG-16 型旋耕播种机上,牵引采用沃龙 DX1204 型悬挂式拖拉机。装置安装位置如图 11 所示。试验时人工驾驶拖拉机,在经过镇压平整的土槽平台上匀速前进,速度 2 km/h。因测试用的旋耕播种机最大耕深为 15 cm 左右,在测试时,将机具耕深设为 8、12、15 cm。



图 11 耕深测量装置安装位置

Fig. 11 Installation position of tillage depth measuring device

耕整机组行进过程受到拖拉机本身振动和土壤起伏影响,耕深具有波动性。图 12 为预设耕深 8、12、15 cm 下耕深测量装置在土槽平台上的测量结果,经过滤波处理后数据相对平滑,消除了部分噪声影响,且与预设耕深较为贴合。在耕深为 8、12、15 cm 的测量中,经过处理过后最大偏差为 1.63、

1.80、1.18 cm,平均值为 8.11、12.35、15.10 cm,耕深变异系数为 6.37%、5.28% 和 2.68%。说明经过滤波处理后耕深测量数据在设定耕深附近波动程度较小。

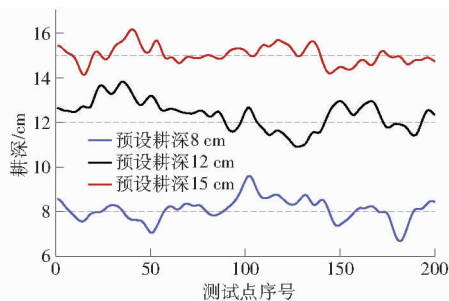


图 12 土槽试验结果

Fig. 12 Soil bin test results

人工测量耕深与耕深测量装置测量结果如图 13 所示。由图 13 可知,通过耕深测量装置测量耕深与人工测量耕深基本吻合。共测量 12 个点,其中误差最大值为 0.43 cm,误差平均值为 0.26 cm,均方根误差为 0.24 cm。原因为人工取点与测量装置取值方式并不一致。

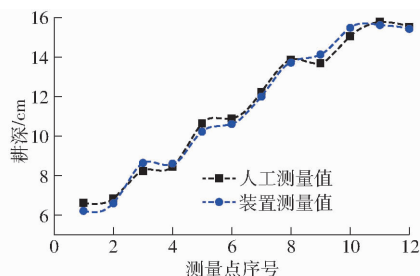


图 13 人工测量与装置测量对比

Fig. 13 Comparison between manual measurement and device measurement

6 结论

(1) 设计了 1 套用于试验鉴定的耕作机具在线耕深鉴定测量装置,通过激光测距传感器与九轴姿态传感器协同采集耕作机具动态作业数据,结合高斯滤波与卡尔曼滤波算法实现数据降噪与融合,实时在线计算耕深,有效抑制了农机振动噪声,实现了耕深连续动态监测。

(2) 利用室内水平土槽试验时耕深测量装置测量数据的准确性进行了验证。静态测试中,加权融合数据与人工测量数据对比,最大误差为 0.43 cm,平均误差为 0.26 cm,均方根误差为 0.24 cm。在预设耕深为 8、12、15 cm 的动态测量中,最大偏差为 1.63、1.80、1.18 cm,耕深变异系数为 6.37%、5.28% 和 2.68%,能够满足耕作机具试验鉴定要求。

参 考 文 献

- [1] 韩雪,周小燕,白蒙亮. 我国农业机械试验鉴定“十三五”发展研究[J]. 中国农机化学报,2017,38(1): 141-145.
HAN Xue, ZHOU Xiaoyan, BAI Mengliang. Development research of agricultural machinery test and evaluation in China during 13th five-year plan period[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(1): 141-145. (in Chinese)
- [2] SCARPARE F V, VAN L Q J, CAMARGO L, et al. Tillage effects on soil physical condition and root growth associated with sugarcane water availability[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 187:110-118.
- [3] 中华人民共和国农业农村部. 耕地质量监测技术规程:NY/T 1119—2019[S]. 北京:中国农业出版社,2019.
- [4] 谢宇峰,许剑平,李存斌,等. 国内外耕作机械的现状与发展趋势[J]. 农机化研究,2009,31(11):238-240,246.
XIE Yufeng, XU Jianping, LI Cunbin, et al. Current situation and development trends of tillage machinery at home and abroad [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(11): 238-240, 246. (in Chinese)
- [5] 高蕾,杨方,王润涛,等. 旋耕机松土深度检测系统设计[J]. 农机化研究,2013,35(5):159-162.
GAO Lei, YANG Fang, WANG Runtao, et al. Design of loosening depth detection system for rotary tillers [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(5): 159-162. (in Chinese)
- [6] 马若飞,伟利国,赵博,等. 基于多传感器数据融合的旋耕耕深检测系统研究[J]. 农业机械学报,2024,55(9):52-64.
MA Ruofei, WEI Liguang, ZHAO Bo, et al. Rotary tillage depth detection based on multi-sensor data fusion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 52-64. (in Chinese)
- [7] 蒋啸虎,佟金,马云海,等. 基于卡尔曼滤波融合算法的深松耕深检测装置研究[J]. 农业机械学报,2020,51(9):53-60.
JIANG Xiaohu, TONG Jin, MA Yunhai, et al. Study of tillage depth detecting device based on Kalman filter and fusion algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 53-60. (in Chinese)
- [8] 李栋. 基于角度检测的悬挂耕深电液监控系统设计与试验[D]. 武汉:华中农业大学,2021.
LI Dong. Design and experimentation of an electro-hydraulic monitoring system for hitch tillage depth based on angle measurements[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2021. (in Chinese)
- [9] 汪凌. 水田旋耕耕深与平整度测量方案研究[D]. 武汉:湖北工业大学,2021.
WANG Ling. Research on the measurement method of paddy rotary tillage depth and field flatness [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [10] SUOMI P, OKSANEN T. Automatic working depth control for seed drill using ISO 11783 remote control messages [J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2015, 116: 30-35.
- [11] ERZ M. Computer vision based pose detection of agricultural implements without a priori knowledge of their geometry and visual appearance[C]//2018 15th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS), 2018: 1-6.
- [12] 李青龙,孙永佳,孙宜田,等. 基于DSP的深松整地联合作业机监控系统的研制[J]. 农机化研究,2016,38(11):118-122.
LI Qinglong, SUN Yongjia, SUN Yitian, et al. Development of monitoring system for subsoiling and land preparation combined operation machine based on DSP [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(11): 118-122. (in Chinese)
- [13] 商高高,刘存昊,韩江义. 线性拟合与Kalman预测法修正耕深测量误差[J]. 农业工程学报,2017,33(22):183-188.
SHANG Gaogao, LIU Cunhao, HAN Jiangyi. Modification of tilling depth measurement errors by linear fitting and Kalman prediction method[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(22): 183-188. (in Chinese)
- [14] 杜新武,杨绪龙,庞靖,等. 悬挂式旋耕机耕深监测系统设计及试验[J]. 农业机械学报,2019,50(8):43-51.
DU Xinwu, YANG Xulong, PANG Jing, et al. Design and test of tillage depth monitoring system for suspended rotary tiller [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 43-51. (in Chinese)
- [15] PARKER D H, SCHWAB F R, SHELTON J W, et al. Calibration and modeling of a dual-axis inclinometer[J]. Precision Engineering, 2005, 29(3): 381-385.
- [16] 杨少奇,张磊,张含思,等. 悬挂式深松机耕深自动测量及控制方法的研究[J]. 农业与技术,2019,39(24):56-58.
YANG Shaoqi, ZHANG Lei, ZHANG Hansi, et al. Research on automatic measurement and control method for tillage depth of suspended subsoiler[J]. Agriculture and Technology, 2019, 39(24): 56-58. (in Chinese)
- [17] 尹彦鑫,王成,孟志军,等. 悬挂式深松机耕整地耕深检测方法研究[J]. 农业机械学报,2018,49(4):68-74.
YIN Yanxin, WANG Cheng, MENG Zhijun, et al. Operation quality measurement method for tilling depth of suspended subsoiler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 68-74. (in Chinese)
- [18] 丁瑞华. 深松机耕地深度测量监控系统研究[J]. 中国农机化学报,2017,38(1):91-95.
DING Ruihua. Research on depth measurement and monitoring system for subsoiler tillage[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(1): 91-95. (in Chinese)
- [19] JINYUAN X, BAOXING G, GUANGZHAO T. Review of agricultural IoT technology [J]. Artificial Intelligence in Agriculture, 2022, 6:10-22.
- [20] 齐琦. 基于高斯过程回归的车载激光雷达地面点滤波研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2020.
QI Qi. Research on ground point filtering of vehicle LiDAR based on Gaussian process regression [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [21] 樊宪唐,张斌,马鹏阁,等. 低信噪比下多高斯脉冲组成的激光雷达回波信号滤波算法[J]. 电光与控制,2014,21(9):

11 - 15.

FAN Xiantang, ZHANG Bin, MA Pengge, et al. A filter algorithm for laser radar echo signal of multi-Gaussian pulse at low SNR[J]. *Electronics Optics & Control*, 2014, 21(9): 11 - 15. (in Chinese)

- [22] 程倩, 胡金萍. 基于多激光传感器的高精度三维在线测量技术[J]. *激光杂志*, 2020, 41(12): 37 - 40.
CHENG Qian, HU Jinping. High precision 3D online measurement technology based on multi-laser sensor[J]. *Laser Journal*, 2020, 41(12): 37 - 40. (in Chinese)
- [23] 谢敏, 赵来定, 王召文. 惯性测量单元姿态融合的动态分析[J]. *信息技术与网络安全*, 2021, 40(7): 95 - 102.
XIE Min, ZHAO Laiding, WANG Zhaowen. Dynamic analysis of attitude fusion for inertial measurement unit[J]. *Information Technology and Network Security*, 2021, 40(7): 95 - 102. (in Chinese)
- [24] TNUNAY H, LI Z, DING Z. Distributed nonlinear Kalman filter with communication protocol[J]. *Information Sciences*, 2020, 513: 270 - 288.
- [25] MARELLI D, ZAMANI M, FU M, et al. Distributed Kalman filter in a network of linear systems[J]. *Systems & Control Letters*, 2018, 116: 71 - 77.
- [26] 沈跃, 张念, 孙志伟, 等. 基于多速率卡尔曼滤波的植保无人机仿地飞行方法[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(3): 190 - 197.
SHEN Yue, ZHANG Nian, SUN Zhiwei, et al. Terrain following flight for plant protection UAV based on multi-rate Kalman filter[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(3): 190 - 197. (in Chinese)
- [27] DAID A, BUSVELLE E, AIDENE M. On the convergence of the unscented Kalman filter[J]. *European Journal of Control*, 2021, 57: 125 - 134.
- [28] 张兆国, 朱时亮, 王法安, 等. 基于改进自适应卡尔曼滤波算法的温室 UWB 定位技术[J]. *农业机械学报*, 2025, 56(3): 494 - 502, 522.
ZHANG Zhaoguo, ZHU Shiliang, WANG Faan, et al. UWB greenhouse positioning technology based on improved adaptive Kalman filter algorithm[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2025, 56(3): 494 - 502, 522. (in Chinese)

(上接第 11 页)

- [25] 张银平, 郝泽华, 徐婷, 等. 玉米免耕播种机动力补偿自适应清秸装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2025, 56(1): 174 - 185.
ZHANG Yinping, HAO Zehua, XU Ting, et al. Design and experiment of dynamic compensation adaptive straw removal device for corn no-till seeder[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2025, 56(1): 174 - 185. (in Chinese)
- [26] 王金峰, 张鑫, 唐汉, 等. 水稻秸秆反旋深埋滑切还田刀优化设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(11): 28 - 39.
WANG Jinfeng, ZHANG Xin, TANG Han, et al. Optimal design and experiment of deep-buried reverse rotating sliding cutting straw returning blade[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(11): 28 - 39. (in Chinese)
- [27] 廖庆喜, 谢昊明, 张青松, 等. 驱动圆盘犁与双刃型旋耕刀组合适耕整机设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(7): 99 - 110, 195.
LIAO Qingxi, XIE Haoming, ZHANG Qingsong, et al. Design and experiment of driven disc plow and double-edged rotary tillage combined tiller[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(7): 99 - 110, 195. (in Chinese)
- [28] 刘芳建, 米义, 廖娜, 等. 立式旋耕机的研究设计与试验[J]. *农机化研究*, 2017, 39(11): 81 - 84.
LIU Fangjian, MI Yi, LIAO Na, et al. Research design of vertical rotary cultivator and experiment[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2017, 39(11): 81 - 84. (in Chinese)
- [29] 扈伟昊. 基于离散元法的立式旋耕作业分析与关键部件参数优化[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2023.
HU Weihao. Operation analysis of vertical rotary tillage and parameter optimization of key components based on discrete element method[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [30] VARANI M, MATTEI M, MOLARI G, et al. Correlation between power harrow energy demand and tilled soil aggregate dimensions[J]. *Biosystems Engineering*, 2023, 225: 54 - 68.
- [31] 杨庆璐, 律政文, 闫银发, 等. 桑园立式旋耕动力耙优化设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2025, 56(1): 210 - 220.
YANG Qinglu, LÜ Zhengwen, YAN Yinfa, et al. Optimization design and experiment of vertical rotary harrow for mulberry plantation[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2025, 56(1): 210 - 220. (in Chinese)
- [32] 中国国家标准化管理委员会. 免(少)耕施肥播种机: GB/T 20865—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [33] 农业农村部. 玉米免耕播种机作业质量: NY/T 1628—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [34] 夏晓蒙. 高速免耕精密播种机清秸装置及播深控制技术[D]. 长春: 吉林大学, 2024.
XIA Xiaomeng. Research on row cleaning mechanism and sowing depth control technology of high-speed no-tillage precision planter[D]. Changchun: Jilin University, 2024. (in Chinese)