

申 报	系列：教学科研 型
	专业：农业电气 化与自动化
	职称：副教授

业绩成果材料

(申报人的业绩成果材料包括论文、科研项目、获奖以及其他成果等)

单 位 (二级单位) 工程学院

姓 名 黄培奎

材料核对人：

单位盖章：

核对时间：

华南农业大学制

目 录

一、教学研究业绩

1. 教学研究项目：关于《学科交叉融合助推卓越农林人才培养——以传感器与检测技术课程为例》项目的佐证材料.....1
2. 教学研究项目：关于《智能农机实现无人化智慧农场的探索与实践 ——以广东万绿智慧无人农场为例》项目的佐证材料..... 2
3. 教学比赛证明..... 4
4. 编写教材：十四五规划教材《大田无人化智慧农场》5

二、科研项目

1. 主持：关于《机群协同无人驾驶技术与装备创制》项目的佐证材料..... 14
2. 主持：关于《水稻无人农场全覆盖作业路径规划关键技术研究》项目的佐证材料..... 16
3. 主持：关于《“龙岩供销农场”数智化建设》项目的佐证材料.....17
4. 主持：关于《农业无人化作业技术装备研发与系统集成》项目的佐证材料..... 20
5. 主参：关于《水稻无人化智慧农场关键技术与应用示范》项目的佐证材料..... 22
6. 主参：关于《收获环境感知与自主协同作业技术系统研发》项目的佐证材料..... 25
7. 主参：关于《花生和水稻新品种及轻简化栽培技术的引进与示范推广》项目的佐证材料..... 28

三、论文、著作等

1. 检索证明.....	30
2. 以第一作者发表本专业论文情况	
2.1. 谷物联合收获机压力式在线测产系统设计与试验.....	31
3. 以通讯作者发表本专业论文情况	
3.1. 基于两位置法与改进 STEKF 的农机航向角测量方法 ...	45
3.2. 融合改进 YOLOv5s 与毫米波雷达的避障目标检测方法.	56
4. 参编学术专著	
4.1 大田无人化智慧农场.....	70

四、科研成果

1. 知识产权	
1.1. 专利授权证书：农机作业路径规划方法、装置.....	79
1.2. 实用新型专利授权证书：一种手自一体线控系统、无人化收获机及试验装置.....	80
1.3. 软件著作权登记证书：Unity3D 拖拉机自动驾驶仿真系统 V1.0.....	81
2. 科研平台	
2.1. 农业技术装备全国重点实验室.....	82
2.2. 广东省无人化智慧农场工程技术研究中心.....	85
2.3. 农业农村部水田农业机械装备重点实验室.....	88

五、其他业绩

1. 指导学生学科竞赛	
1.1. 第十届国际大学生智能农业装备创新大赛一等奖.....	92
1.2. RoboMaster 2025 机甲大师超级对抗赛·全国赛一等奖	93

1.3.RoboMaster 2025 机甲大师超级对抗赛·区域赛一等奖	94
2. 其它	
2.1. 中国精品科技期刊顶尖学术论文领跑者 5000.....	95
2.2.WFP 感谢信.....	96
2.3. 第二十五届“广东青年五四奖章集体”	97
2.4. 中国产学研百佳科技创新团队.....	98
2.5. 中国农业重大科技新成果.....	99
2.6. 第七届中国科协优秀科技论文遴选计划优秀论文.....	100

1. 教学研究项目：关于《学科交叉融合助推卓越农林人才培养——以传感器与检测技术课程为例》项目的佐证材料



华南农业大学
South China Agricultural University

学校概况 机构设置 师资队伍 人才培养 科学研究 社会服务 校园文

关于公示2025年度校级本科教学质量与教学改革工程项目拟立项名单的通知

来源单位及审核人： 编辑： 审核发布：本科生院（招生办公室） 发布时间：2025-09-25

各学院、部处、各单位：

根据《关于开展2025年度校级本科教学质量与教学改革工程项目申报工作的通知》精神，经项目负责人申报、所在单位推荐和学校组织专家评审或本科生院审核等程序，拟立项“基于OBE理念的‘数字赋能、思政融合、产教协同’的《制药设备与工艺设计》课程育人模式研究与实践”等127个项目为2025年度校级本科教学改革项目；拟立项“农林院校‘智能建造’人才特色班”等52个项目为2025年度校级本科质量工程项目。现予以公示，具体名单见附件。

公示期自2025年9月25日至9月29日。如有异议，请在公示期内以书面方式提交至行政楼329房（附必要的证据材料，并署真实姓名），未署真实姓名或逾期者不予受理。

- 附件：1. 2025年度校级本科教学改革拟立项名单.xlsx
2. 2025年度校级本科质量工程拟立项名单.xls

本科生院（招生办公室）
2025年9月25日

53	教学改革项目	通过临床案例学习解剖学消化系统下消化道章节	自筹	兽医学院	许丹
54	教学改革项目	人工智能赋能的家畜行为学课程教学改革与实践	自筹	动物科学学院	张玲娜
55	教学改革项目	安全心理视域下高校科研实验室安全管理的干预机制与路径研究	自筹	资源环境学院	谢洁芬
56	教学改革项目	面向全栈化与智能化的《网络GIS》课程教学体系优化研究与实践	自筹	资源环境学院	谢健文
57	教学改革项目	基于实景三维中国建设背景下测绘综合应用实习教学改革	自筹	资源环境学院	陈俊林
58	教学改革项目	基于创新能力培养的《水产动物营养与饲料》课程教学改革与实践	自筹	海洋学院	陈世俊
59	教学改革项目	数智化背景下《海洋环境化学》的教学改革探索与实践	自筹	海洋学院	黄玉妹
60	教学改革项目	人工智能赋能基因工程智慧教学模式改革	自筹	生命科学学院	陈亮
61	教学改革项目	AI赋能“新农科”背景下植物生理学课程改革的探索与应用	自筹	生命科学学院	刘宇婷
62	教学改革项目	学科交叉融合助推卓越农林人才培养——以传感器与检测技术课程为例	自筹	工程学院	黄培奎
63	教学改革项目	基于AI赋能的《机械制造基础》课程“三位一体”贯通式教学改革与实践	自筹	工程学院	曹亚超
64	教学改革项目	“AI+教学”模式下控制理论课程思政教学体系构建与实践	自筹	工程学院	邢航
65	教学改革项目	基于OBE理念的混合AI智慧教学模式在机械制造工艺学和夹具设计课程中的应用与实践探索	自筹	工程学院	黄光文
66	教学改革项目	科研反哺教学在《食品包装学》课程中的探索与实践	自筹	食品学院	葛文娇
67	教学改革项目	虚拟仿真实验技术在“食品微生物检验实验”教学中的应用探索	自筹	食品学院	邹苑

安全退出
申报人 | 黄培奎
项目管理 首页 教研项目 系统帮助 通知公告

校级项目
我的项目 参与项目

年度 全部 项目类别 全部
负责人
更多条件

设置参与人权限
导出
查询

序号	年度	项目编号	项目类别	子类	项目名称	项目单位	负责人	项目阶段	项目状态
1	2025		教学改革项目		学科交叉融合助推卓越农林人才培养——以传感器与检测技术课程为例	工程学院	黄培奎	申报阶段	待学校审查

2. 教学研究项目：关于《智能农机实现无人化智慧农场的探索与实践 ——以广东万绿智慧无人农场为例》项目的佐证材料

2023 年主题案例征集

申报书

项目名称：智能农机实现无人化智慧农场的探索与实践
——以广东万绿智慧无人农场为例

首席专家：胡炼

所在单位：10564 华南农业大学

填表日期：

教育部学位与研究生教育发展中心
2023 年制

一、基本信息

主题方向	<input type="checkbox"/> 走出去 <input type="checkbox"/> 区域协调发展 <input type="checkbox"/> 中华传承 <input checked="" type="checkbox"/> 大国智造					
项目名称	智能农机实现无人化智慧农场的探索与实践——以广东万绿智慧无人农场为例					
关键词	无人农场, 智能农机, 智慧农业					
涉及专业学位类别	农业					
首席专家						
姓名	胡炼	性别	男	所在单位	10564 华南农业大学	
行政职务	重点实验室主任	职称	正高级	移动电话		
通讯地址	广东省广州市天河区五山路 483 号华南农业大学 农业工程楼 304			电子邮箱	lianhu@scau.edu.cn	
主要团队成员（一般不超过 5 人）						
姓名	性别	出生年月	职务	职称	所在单位	移动电话
何杰	男		无	副高级	10564 华南农业大学	----
汪沛	男		无	副高级	10564 华南农业大学	
黄培奎	男		无	副高级	10564 华南农业大学	
赵润茂	男		无	副高级	10564 华南农业大学	
高锐涛	男		系主任	正高级	10564 华南农业大学	
预期成果形式及数量	A.教学型案例_1_个 B.研究型案例_1_篇					

3. 教学比赛证明

当前位置: 首页 通知公告

通知公告

华南农业大学2024-2025学年“青年教师教学优秀奖”获奖名单公示

2025-12-31 来源

各学院(部、中心):

根据《华南农业大学青年教师教学优秀奖评选办法》(华南农办〔2017〕71号)要求,经各学院(部、中心)推荐、学校审核、评奖专家组评审,确定廖建昭等20位教师获得华南农业大学2024-2025学年“青年教师教学优秀奖”。现将获奖名单(按成绩排序)予以公示。

奖项	姓名	比赛课程	单位
一等奖	廖建昭	兽医临床诊断学	兽医学院
	罗均	兽医微生物学	兽医学院
	李征	中国近现代史纲要	马克思主义学院
二等奖	刘朝洁	园艺植物生物技术	园艺学院
	朱真文	遗传学	动物科学学院
	梁丽娟	中外文化比较	外国语学院
	孙华	中国近现代史纲要	马克思主义学院
	罗晓妍	现代汉语	人文与法学学院
	黄欢	结构力学	水利与土木工程学院
	黄培强	传感器与检测技术	工学院
三等奖	高钊文	作物栽培学	农学院
	魏世那	船舶生物学	海洋学院
	曹敏	大学生心理健康教育	公共管理学院
	魏丹纯	英语写作	国际教育学院
	刘京一	景观生态学	林业与风景园林学院
	卢家欢	机械设计基础	工学院
	陈立星	测量学	资源环境学院
	安静	农业标准化体系	农学院
	陈菁	公司金融	经济管理学院

公示期自2025年12月31日至2026年1月5日。如对结果有异议,请在公示期内以书面方式向本科生院教师教学发展中心实名反映,匿名不予受理。

联系人: 卢老师 朱老师
地址: 教师教学发展中心
邮箱: jsfzxx@scau.edu.cn

本科生院
2025年12月31日

4. 编写教材：十四五规划教材《大田无人化智慧农场》



内 容 简 介

无人化智慧农场是智慧农业的主要实现方式,是一个多学科交叉的应用领域,涉及农业工程、车辆工程、控制工程、计算机科学与技术、机器人工程等,并融合了自动驾驶、机器视觉、深度学习、遥感信息和农机-农艺融合等前沿技术。

本书的作者为高校从事智慧农业方向的教师、科研人员和研究生,依托“无人化智慧农场”团队的教研与推广实践,全面详细地介绍了大田无人化智慧农场的技术体系,内容涵盖了从农场规划建设至运行维护所涉及的各个环节,重点阐述支撑农场高效生产的智能农机装备的相关理论与方法,特别是线控底盘、卫星定位、路径规划、导航控制、自动驾驶和多机协同等。本书适合作为现代农业研究人员和应用技术人员的参考资料,也可作为农业工程、智慧农业和车辆工程等相关专业研究生、本科生和专科生学习资料。

图书在版编目(CIP)数据

大田无人化智慧农场/罗锡文,胡炼主编.--北京:中国农业大学出版社,2024.12.
ISBN 978-7-5655-3346-4

I. S126

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2024JS6117 号

书 名 大田无人化智慧农场

Datian Wurenhua Zhihui Nongchang

作 者 罗锡文 胡 炼 主编

总 策 划	王筠利 丛锐红 张秀环	责任编辑	刘 聪 石 华 蔡恩嘉
策划编辑	刘 聪 石 华	封面设计	中通世奥图文设计中心
出版发行	中国农业大学出版社		
社 址	北京市海淀区圆明园西路2号	邮政编码	100193
电 话	发行部 010-62733489,1190	读者服务部	010-62732335
	编辑部 010-62732617,2618	出 版 部	010-62733440
网 址	http://www.caupress.cn	E-mail	cbsszs@cau.edu.cn
经 销	新华书店		
印 刷	涿州市星河印刷有限公司		
版 次	2024年12月第1版 2024年12月第1次印刷		
规 格	185 mm×260 mm 16开本 23.5印张 509千字		
定 价	128.00元		

图书如有质量问题本社发行部负责调换

编委会

主 编:罗锡文 胡 炼

副主编:何 杰 赵润茂

编 委:汪 沛 黄培奎 陈高隆 涂因鹏

第1章 绪论	1
1.1 农业机械化发展阶段概述	1
1.1.1 1.0 原始生产阶段	1
1.1.2 2.0 传统生产阶段	2
1.1.3 3.0 机械化生产阶段	2
1.1.4 4.0 智慧化生产阶段	3
1.2 大田无人化智慧农场的发展需求	3
1.2.1 现代农业发展的需求	3
1.2.2 解决“谁来种地”和“怎样种地”的需求	4
第2章 大田无人化智慧农场概述	6
2.1 大田无人化智慧农场的概念	6
2.2 大田无人化智慧农场的系统架构	6
2.3 大田无人化智慧农场的关键技术	7
2.3.1 数字化感知技术	7
2.3.2 智能化决策	10
2.3.3 精准化作业	11
2.3.4 智慧化管理	14
参考文献	15
第3章 大田无人化智慧农场基础设施	16
3.1 大田无人化智慧农场整体规划	16
3.2 农场仓储设施建设	16
3.2.1 农机机库	16
3.2.2 粮仓与物料仓库	17
3.3 大田无人化智慧农场的农田建设	17
3.3.1 规模化	17
3.3.2 宜机化	18
3.3.3 田间道路	19
3.3.4 农田标准化改造模式	20

3.4 田间智能设施建设	21
3.4.1 灌溉设施	21
3.4.2 电力设施	21
3.4.3 传感器设施	21
3.5 农田建设案例	21
第4章 大田作业农机构造基础	23
4.1 大田作业农机概述	23
4.2 农机转向系统	23
4.2.1 前轮转向	24
4.2.2 后轮转向	26
4.2.3 四轮转向	27
4.2.4 折腰转向	27
4.2.5 差速转向	29
4.3 农机动力与机具连接	30
4.3.1 电控液压三点悬挂系统	30
4.3.2 快速连接结构	32
4.3.3 PTO 动力输出	34
4.3.4 液压输出阀组	35
4.4 总线技术	35
4.4.1 SAE J1939	35
4.4.2 ISO 11783	36
4.4.3 ISOBUS	36
4.5 底盘线控技术	38
4.5.1 概念	38
4.5.2 线控底盘中的典型技术	39
参考文献	42
第5章 数字化感知关键技术	43
5.1 作业环境信息感知	43
5.1.1 高精度地图	43
5.1.2 水、温度、气象	50
5.1.3 土壤	52
5.1.4 水田硬度层感知	53
5.2 作业对象信息感知	69
5.2.1 作物长势	69
5.2.2 病虫害	73
5.2.3 处方图	75

5.3 作业机械信息感知	79
5.3.1 农机机械的性能参数	79
5.3.2 传感器加装与测量方法	80
5.3.3 测得数据的使用方法	80
5.3.4 具体农机实例说明	81
参考文献	81
第6章 路径规划关键技术	84
6.1 运移路径规划	84
6.1.1 基于路网的双向 Dijkstra 运移路径规划算法	84
6.1.2 运移路径试验验证	86
6.2 不同地块形状作业路径规划	88
6.2.1 轮廓形状的描述指标	88
6.2.2 作业路径规划	91
6.3 农机转弯路径规划方式	95
6.3.1 弓形、半圆形、鱼尾形转弯算法	97
6.3.2 “ \square ”形“ M ”形转弯算法	100
6.3.3 螺旋式转弯算法	102
6.4 全覆盖作业路径规划	107
6.4.1 耕作环节路径规划	108
6.4.2 种植环节路径规划	108
6.4.3 管理环节路径规划	109
6.4.4 收获环节路径规划	109
6.4.5 开边/封园路径规划	109
6.4.6 多约束全覆盖路径规划	111
6.5 避障路径规划	113
6.5.1 直接构造法	114
6.5.2 样条曲线	116
6.6 智能路径规划算法	117
6.6.1 智能全局路径规划	117
6.6.2 智能局部路径规划	123
参考文献	125
第7章 农机无人驾驶控制关键技术	126
7.1 定位技术	126
7.1.1 全球卫星导航系统	126
7.1.2 多传感器融合定位技术	131
7.1.3 单天线 GNSS/INS 组合导航	133

7.2 农机无人驾驶坐标系统	157
7.2.1 参考坐标系建立	157
7.2.2 坐标系转换	158
7.3 导航控制技术	159
7.3.1 农机运动的数学模型	159
7.3.2 农机转向控制	165
7.3.3 路径跟踪控制	170
参考文献	176
第8章 精准作业关键技术	178
8.1 精准耕整	178
8.1.1 耕深监测与自动控制	178
8.1.2 动力自适应匹配	182
8.1.3 精准平整	184
8.2 精准种植	193
8.2.1 水稻育秧播种(密植、钵苗、钵毯苗)	193
8.2.2 精量直播	197
8.3 精准管理	200
8.3.1 水管理	200
8.3.2 肥管理	209
8.3.3 药管理	212
8.3.4 草管	215
8.4 精准收获	221
8.4.1 精准对行	221
8.4.2 喂入量估计	224
8.4.3 自动卸粮	228
8.4.4 智能测产	233
参考文献	235
第9章 协同作业关键技术	238
9.1 主从协同作业关键技术	238
9.1.1 等待模式	238
9.1.2 跟随模式	245
9.2 多机协同作业关键技术	250
9.2.1 地面农机群体协同作业	250
9.2.2 多机协同作业	257
9.3 人机协同作业关键技术	261
9.3.1 人机协同作业技术概述	261

9.3.2 无人和人工驾驶农机协同作业区域的划分	261
9.4 不同生产环节协同关键技术	262
9.4.1 耕整地作业场景	263
9.4.2 种植作业场景	264
9.4.3 植保作业场景	266
9.4.4 收获作业场景	266
参考文献	267
第 10 章 智慧化管理关键技术	269
10.1 信息传输	269
10.1.1 物联网	269
10.1.2 4G/5G	271
10.2 作物生长管理	272
10.3 智能农机管理	278
10.4 农场管理	281
10.4.1 农事管理:全程精细化与智能化	281
10.4.2 农资管理:精准化与绿色化	285
10.4.3 经营管理:节本增效与可持续发展	285
10.5 无人农机管控平台	286
10.5.1 无人农机管控平台概述	286
10.5.2 无人农机管控平台的架构设计	287
10.5.3 相关案例	288
参考文献	292
第 11 章 大田无人化智慧农场安全技术	293
11.1 大田无人化智慧农场安全概述	293
11.2 大田无人化智慧农场安全技术	294
11.2.1 路径规划	294
11.2.2 主动感知	295
11.2.3 车路协同	301
11.2.4 碰撞接触	304
11.2.5 急停避障	305
11.2.6 信息安全	311
11.3 安全系统设计	317
11.3.1 安全系统功能设计	317
11.3.2 安全功能冗余设计	320
11.3.3 安全规范	322
参考文献	325

第 12 章 大田无人化智慧农场应用	326
12.1 大麦无人化智慧农场实践(Hands Free Hectare project)	326
12.2 广东增城水稻无人化智慧农场	326
12.2.1 项目背景	326
12.2.2 无人化作业实施	328
12.2.3 建设成效	332
12.3 湖南大通湖再生稻无人化智慧农场	332
12.3.1 项目背景	332
12.3.2 无人化作业实施	333
12.3.3 建设成效	340
12.4 上海联适水稻无人化智慧农场	341
12.4.1 项目背景	341
12.4.2 无人化作业实施	341
12.4.3 建设成效	346
12.5 安徽三山大田无人化智慧农场	346
12.5.1 项目背景	346
12.5.2 无人化作业实施	346
12.5.3 社会效益	349
12.6 黑龙江七星大田无人化智慧农场	349
12.6.1 项目背景	349
12.6.2 水稻生产智能化流程	350
12.6.3 小麦生产全程无人化	350
12.6.4 建设成效	351
第 13 章 发展与展望	352
13.1 发展机遇与挑战	352
13.1.1 发展机遇	352
13.1.2 面临挑战	353
13.2 发展趋势展望	354
13.2.1 关键技术创新发展	354
13.2.2 应用规模和场景不断拓展	355
13.2.3 产业体系逐步完善	355

1.主持：关于《机群协同无人驾驶技术研究与装备创制》项目的佐证材料

课题编号：2022SFGC020203

密级：公开

山东省重点研发计划（科技示范工程）

课题任务书

项目名称：大型智能农机装备共性关键技术研究~~与装备创制~~
产业名称：科技示范工程
项目承担单位：北谷电子股份有限公司（公章）
课题名称：机群协同无人驾驶技术研究与装备创制
课题承担单位：华南农业大学（公章）
课题负责人：黄景奎
执行期限：2022年11月至2025年12月

2022年10月

2.主持：关于《水稻无人农场全覆盖作业路径规划关键技术
研究》项目的佐证材料

受理编号：SL2023A04J00077

广州市科技计划项目 申报书

项目名称：	水稻无人农场全覆盖作业路径规划关键技术研究
申报单位：	华南农业大学
项目负责人：	黄培奎
计划类别：	基础研究计划
专题名称：	基础与应用基础研究专题
支持方向：	青年博士“启航”项目
组织单位：	华南农业大学
起止时间：	2024-01-01 至 2025-12-31
主管处室：	基础研究处

广州市科学技术局制

二〇二三年

3.主持：关于《“龙岩供销农场”数智化建设》项目的佐证
材料

技术服务合同

项目名称：“龙岩供销农场”数智化建设

委 托 方：龙岩市供销合作社联合社（甲方）
福建供销百农汇科技有限公司（丙方）

受 托 方：华南农业大学（乙方）

签订时间：2025年7月18日

签订地点：福建龙岩

有效期限：2025年8月—2027年7月

中华人民共和国科学技术部印制

电话/传真：_____

受托方：华南农业大学（乙方）_____

住 所 地：广东省广州市天河区五山路 483 号_____

法定代表人：薛红卫_____

- 3 -

项目联系人：黄培奎_____

联系方式：_____

通讯地址：华南农业大学农业工程楼 307_____

电 话：_____ 传真：_____

电子信箱：pkhuang@scau.edu.cn_____

为进一步深化广龙对口合作，促进龙岩大米提质、降本、增效，提升大米品牌，更好地进入广州市场，本合同甲方委托乙方就“龙岩供销农场”数智化建设项目进行的专项技术服务，并支付相应的技术服务报酬。双方经过平等协商，在真实、充分地表达各自意愿的基础上，根据《中华人民共和国民法典》的规定，达成如下协议，并由双方共同恪守。

第一条：甲方委托乙方进行技术服务的内容如下：

1. 技术服务的目标：乙方为甲方提供技术支持，协助甲方开展供销

委托方（甲方）：

龙岩市供销合作社联合社 _____（盖章）

法定代表人 / 委托代理人： _____（签名）



_____年 月 日

福建供销百农汇科技有限公司（丙方） _____（盖章）

法定代表人 / 委托代理人： _____（签名）



_____年 月 日

受托方（乙方）：华南农业大学 _____（盖章）

法定代表人 / 委托代理人： _____（签名）



_____年 月 日

4.主持：关于《农业无人化作业技术装备研发与系统集成》
项目的佐证材料


子课题编号： 2025YFD160010102


国家重点研发计划
子课题任务书

子课题名称：	子课题 1r2
子课题承担单位：	华南农业大学
子课题负责人：	黄培奎
所属课题名称：	农业无人化作业技术装备研发与系统集成示范
课题承担单位：	上海联适导航技术股份有限公司
所属项目：	长三角区域无人化智慧农场技术集成与示范
项目牵头单位：	上海联适导航技术股份有限公司
执行期限：	2025 年 12 月 至 2028 年 11 月

年 月 日

课题承担单位（甲方）：上海联适导航技术股份有限公司

法定代表人签字（签章）：

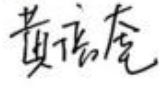
课题负责人签字（签章）：



年 月 日

子课题承担单位（乙方）：


法定代表人签字（签章）：

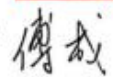
子课题负责人签字（签章）：



年 月 日

项目牵头单位（丙方）：上海联适导航技术股份有限公司

法定代表人签字（签章）：


项目负责人签字（签章）：



年 月 日


5.主参：关于《水稻无人化智慧农场关键技术与应用示范》
项目的佐证材料

广东省科技计划项目任务书	
受理编号: c2342150100022	项目编号: 2023B0202010023
文件编号: 粤科资字(2023)31号	
广东省省级科技计划项目 任务书	
项目名称: 水稻无人化智慧农场关键技术与应用示范	
专项资金类别: 区域创新能力与支撑保障体系建设	
计划类别: 农村科技	
项目起止时间: 2023-01-01 至 2024-12-31	
管理单位(甲方): 广东省科学技术厅	
承担单位(乙方): 华南农业大学	
乙方主管部门(丙方): 华南农业大学	
通讯地址: 广东省广州市天河区五山路483号	
邮政编码: 510642	单位电话: 020-85283435
项目负责人: 胡炼	联系电话: 02038676975
项目联系人: 何杰	联系电话: -----



(广东科技微信公众号)

广东省科学技术厅
二〇一七年制



(受理纸质材料二维码)

广东省科技计划项目任务书

主要研究开发人员								
姓名	年龄	性别	职称	职务	学历	在项目中承担的任务	所在单位	签名
罗锡文		男	教授	主任	硕士研究生	无人农场关键技术	华南农业大学	罗锡文
黄培奎		男	高级工程师	无	博士研究生	无人农场路径规划与控制	华南农业大学	黄培奎
周志艳		男	教授	无	博士研究生	无人机作业技术	华南农业大学	周志艳
张俊汶		男	未取得	副总经理	本科	无人农场生产应用管理	广东万绿智慧农业科技有限公司	张俊汶
郑丁科		男	副教授	副主任	博士研究生	农机优化匹配分析	华南农业大学	郑丁科
陈考科		男	未取得	副总经理	本科	无人农场管理	广东万绿智慧农业科技有限公司	陈考科
何杰		男	实验师	无	博士研究生	无人化种植技术	华南农业大学	何杰
张闻宇		男	讲师	无	博士研究生	无人化收获技术	华南农业大学	张闻宇
汪沛		女	讲师	无	博士研究生	无人农场管控技术	华南农业大学	汪沛
满忠贤		男	未取得	无	博士研究生	无人化农机控制	华南农业大学	满忠贤
陈高隆		男	未取得	无	硕士研究生	无人农场推广模式	华南农业大学	陈高隆
冯达文		男	未取得	无	本科	农业信息技术	华南农业大学	冯达文

九、本任务书签约各方

管理单位（甲方）： 广东省科学技术厅 （盖章） 单位地址： 连新路171号 法定代表人（或授权代表）： <u>龚国平</u> （签章） 立项责任人： <u>叶毓峰</u> （签章）		
承担单位（乙方）： 华南农业大学 （盖章） 二级部门： 华南农业大学工程学院 单位地址： 五山路483号 法定代表人（或法人代理）： <u>刘雅红</u> （签章） 联系人（项目主管）姓名： <u>倪慧群</u> （签章） Email: kjcgxk@scau.edu.cn 电话： 020-85283435 / 开户单位名称： 华南农业大学 开户银行及账号： 广东广州工行五山支行 3602002609000310520		
乙方主管部门（丙方）： 华南农业大学 （盖章） 单位地址： 五山路483号 法定代表人（或法人代理）： <u>刘雅红</u> （签章）		年 月 日

6. 主参：关于《收获环境感知与自主协同作业技术系统研发》
项目的佐证材料

子课题任务合同书

子课题编号：	NK202315010301
子课题名称：	收获环境感知与自主协同作业技术系统研发
子课题承担单位：	华南农业大学
课题负责人：	汪沛
所属课题编号：	NK2023150103
课题牵头单位：	潍柴雷沃智慧农业科技股份有限公司
执行期限：	2023 年 10 月 至 2026 年 12 月

2023 年 10 月

七、子课题参加人员基本情况表

填表说明： 1. 专业技术职称：A、正高级 B、副高级 C、中级 D、初级 E、其他；
 2. 投入本课题的全时工作时间（人月）是指在课题实施期间该人总共为课题工作的满月度工作量；累计是指课题组所有人员投入人月之和；
 3. 人员分类代码：A、课题负责人 B、子课题负责人 C、其他研究人员（仅填固定工作人员）；
 4. 工作单位：填写单位全称，其中高校要具体填写到所在院系。

序号	姓名	性别	出生日期	国籍	证件类型	证件号码	专业技术职称	职务	最高学位	专业	投入本课题的全时工作时间（人月）	人员分类代码	所属子课题	工作单位	签名
1	汪沛	女		中国	身份证		B	无	博士	农业电气化与自动化	10	B	子课题1	华南农业大学工程学院	汪沛
2	黄培奎	男		中国	身份证		B	无	博士	农业电气化与自动化	10	C	子课题1	华南农业大学工程学院	黄培奎
3	贺静	女		中国	身份证		B	无	博士	农业电气化与自动化	10	C	子课题1	华南农业大学工程学院	贺静
4	张强志	男		中国	身份证		C	无	硕士	农业电气化与自动化	10	D	子课题1	华南农业大学工程学院	张强志
累计											40				

子课题任务合同书签署

课题牵头单位（甲方）：

法定代表人签字：



课题负责人签字：

[Handwritten signature]



年 月 日

子课题牵头单位（乙方）：

法定代表人签字：

薛红已

子课题负责人签字：

ldnp



年 月 日

7.主参：关于《花生和水稻新品种及轻简化栽培技术的引进与示范推广》项目的佐证材料

广东省农村科技特派员帮扶工作协议书

甲方：河源市科学技术局

乙方：连平县三角镇驻镇工作队（连平县三角镇人民政府）

丙方：连平县三角镇农村科技特派员团队

团队负责人：陈婷婷（华南农业大学）、成员 1：黄培奎（华南农业大学）、成员 2：金晶（华南农业大学）

为贯彻落实党中央实施乡村振兴战略决策部署，落实省委、省政府关于实施“百县千镇万村高质量发展工程”促进城乡区域协调发展有关部署要求，按照《广东省科技支撑“百县千镇万村高质量发展工程”促进城乡区域协调发展实施方案(试行)》《广东省农村科技特派员科技助力百县千镇万村高质量发展行动计划（2023-2026）》等有关规定，经友好协商，就广东省河源市连平县三角镇农村科技特派员帮扶工作达成如下协议，由各方共同遵守。

一、工作背景

1、乙丙方已于2024年9月13日进行工作对接，对乙方科技需求进行了充分调研和了解。

二、甲方职责和义务

甲方（盖章）：河源市科学技术局

主要负责人/委托人：

2024年11月4日



乙方（盖章）：连平县三角镇驻镇工作队（连平县三角镇人民政府）

法定代表人/委托人/工作队长：

2024年10月29日



丙方：连平县三角镇农村科技特派员团队（加盖团队负责人派出单位学院或科技处章）

主要负责人/委托人：（团队负责人 成员 1、成员 2 签字）



陈婷婷 黄培奎 金晶

2024年10月20日

1. 检索证明



SCAUJIB202625441

检索证明

根据委托人提供的论文材料，委托人华南农业大学工程学院 黄培奎(学科类型:自然科学)3篇论文收录情况如下表。

序号	论文名称	发表刊物及发表的年月卷期/页码等	作者排名	论文等级	作者文中单位	收录情况	影响因子	中科院大类分区
1	谷物联合收获机压力式在线测产系统设计与试验	农业机械学报 出版年: 2025 卷期: 页码: - 文献号: 文献类型:	第一	A类	华南农业大学 工程学院	北大核心	无	无
2	融合改进 YOLO v5s 与毫米波雷达的避障目标检测方法	农业机械学报 出版年: 2025 卷期: 页码: - 文献号: 文献类型:	通讯作者	A类	华南农业大学 工程学院	北大核心	无	无
3	基于两位置法与改进 STEKF 的农机航向角测量方法	农业机械学报 出版年: 2024 卷期: 页码: - 文献号: 文献类型:	通讯作者	A类	华南农业大学 工程学院	北大核心	无	无

说明: 论文等级和中科院大类分区按《华南农业大学学术论文评价方案(试行)》划分。

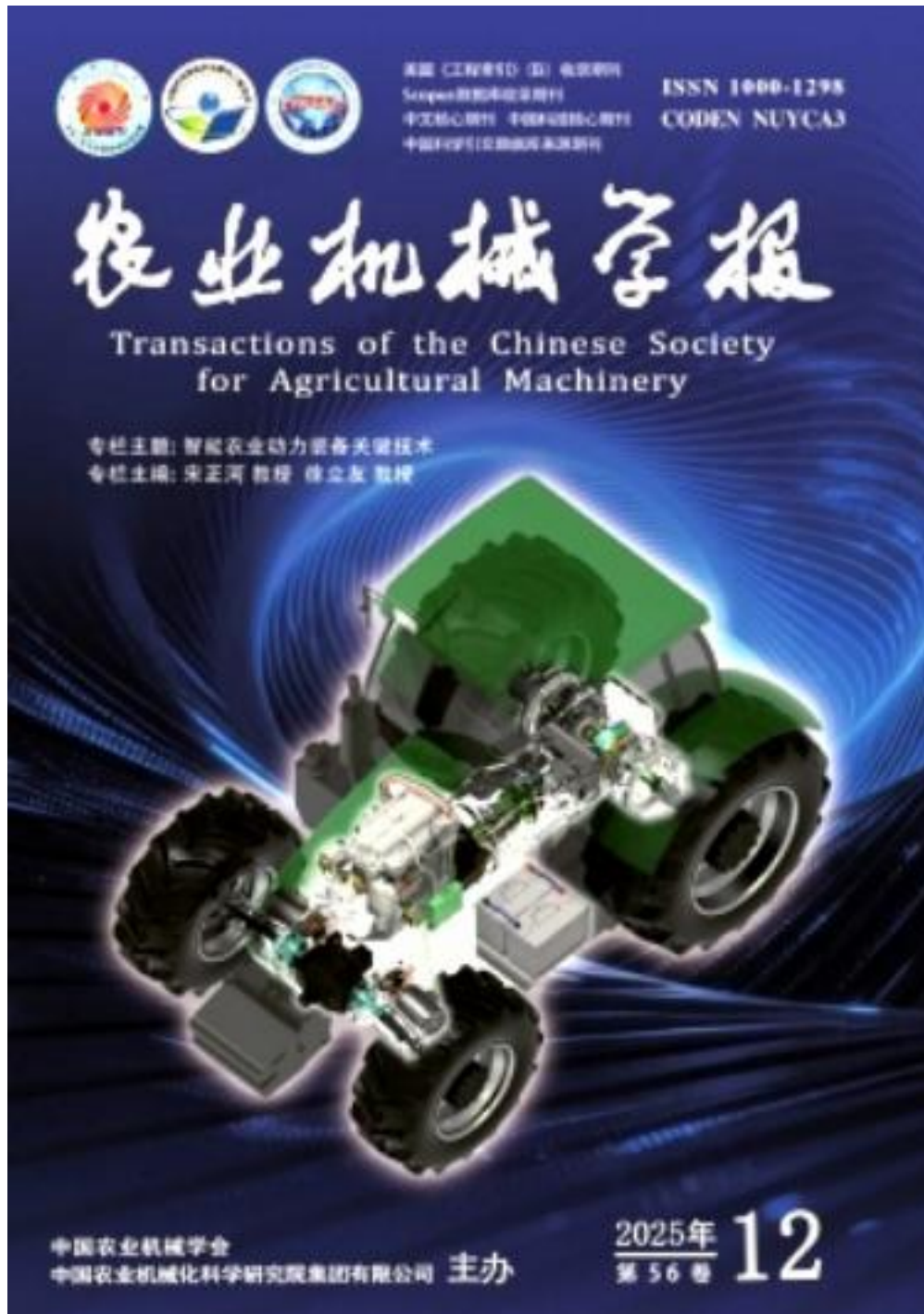
报告免责声明: 如未盖章, 报告无效

检索员: 张进

第 1 页/共 2 页



2.1. 谷物联合收获机压力式在线测产系统设计与试验



农业装备与机械化工程

原茬地免耕播种机液控式仿形限深地轮设计与试验	王 星 唐洪光 刘信昊 陈海涛(211)
油菜直播播种带旋切组合深施肥装置设计与试验	肖文立 廖庆喜 廖宜涛 王旭峰 单伊尹 杜文斌(223)
往复辊式巨菌草精量排种器设计与试验	张建超 孙远泽 郁志宏 李钢铁(235)
基于超螺旋滑模自抗扰的移栽机调平控制系统研究	常 贺 刘立品 崔 巍 刘芳建 张学东 王春喆(247)
茄果类全自动嫁接机接穗取苗装置设计与优化试验	郇晓龙 熊盛森 陈佳峰 章飞杰 童俊华(259)
基于 EDEM 的茶园土壤 - 有机肥混料离散元模型构建与试验	郇晓龙 冯猛超 武传宇 贾江鸣 陈建能(267)
基于时空耦合补偿的处方图式稻麦变量施肥系统研究	丁友强 祁 兵 王云霞 邓 越 AMANTAYEV Maxat 张文毅(279)
基于物联网的干热河谷区葡萄水肥一体化智能调控系统研究	喻黎明 顾晨光 李 娜 付 君 邢立文(289)
基于主动光源的手持式作物 NDVI 传感器设计与试验	喻黎明 顾晨光 李 娜 付 君 邢立文(289)
谷物联合收获机压力式在线测产系统设计与试验	黄培奎 吴培添 许超锐 梁顺达 何 杰 汪 沛 赵润茂 胡 炼 王 培 孙宜田(311)
大豆联合收获机脱粒间隙自适应装置设计与试验	刘安稳 谢方平 朱立学 王修善 季 邦 康家鑫(322)
盐碱地土壤切挤组合式花生挖掘收获装置设计与试验	常增村 王东伟 赵泽龙 奚传智 刘泽琦 侯加林(331)
基于柯恩达效应的小区收获机高效除杂装置辅助板设计与机理研究	李国莹 徐祝欣 李国梁 李 雪 卢志浩 于润之 杨 诚(343)
基于离散元法的谷子脱出物建模与参数标定	张东明 黄紫阳 陈一夫 衣淑娟 李衣菲(354)
基于双模态与模糊自适应 PID 控制的甘蔗收获机切梢器智能定位系统研究	李尚平 任泓宇 莫一凡 韦雨彤 文春明 李凯华(366)
基于张合式刀具的香蕉落梳末端执行器设计与试验	段洁利 莫杏康 黄朝炜 刘博成 杨 洲 邹湘军(376)
基于 SPH - FEM 耦合的残膜 - 根茬 - 弹齿互作规律研究	张学军 史阳阳 鄢金山 史增录 马 旭 侯召全 李华智(386)

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.12.028

谷物联合收获机压力式在线测产系统设计与试验

黄培奎^{1,2} 吴培添¹ 许超锐¹ 梁顺达¹ 何杰^{1,2} 汪沛^{1,2} 赵润茂^{1,2}
胡炼^{1,2} 王培³ 孙宣田⁴

(1. 华南农业大学工程学院, 广州 510642; 2. 农业装备技术国家重点实验室, 北京 100083;

3. 北京市农林科学院智能装备技术研究中心, 北京 100097; 4. 山东省农业机械科学研究院, 济南 250100)

摘要: 为了提高谷物联合收获机在线测产精度并抑制测产过程中车身倾斜与机械振动的干扰, 设计了一种基于倾角与振动补偿策略的压力式谷物测产系统。该系统由压力式谷物测产装置、GNSS定位模块、数据处理器和上位机组成。首先基于谷物产量与传感器压力、倾角、振动、含水率的函数关系构建谷物产量监测数学模型, 并搭建了谷物产量监测试验台架, 通过正交试验结合响应面分析法优化装置结构参数。研究了压力传感器数量、消振器安装位置和测产装置倾角对测产误差的影响, 并确定最优参数组合: 压力传感器数量为5, 振器安装位置为第3参考位置(距左槽壁175 mm处)、装置水平倾角为21°。台架单变量(流量变化)与多变量(流量、倾角及振动变化)试验结果表明, 不同工况下20组试验的测产误差稳定控制在3%以内; 田间试验结果表明, 实际作业中平均测产误差为3.41%, 最大不超过4%, 验证了系统可有效抑制车身倾斜与机械振动对测产精度的干扰, 可为精准农业产量分布信息获取提供有效技术支持。

关键词: 谷物联合收获机; 产量在线监测; 压力式传感器; 倾角与振动补偿

中图分类号: S220; S24 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2025)12-0311-11 OSID: 

Design and Experiment of Pressure Type Online Yield Measurement System for Grain Combine Harvester

HUANG Peikui^{1,2} WU Peitian¹ XU Chaorui¹ LIANG Shunda¹ HE Jie^{1,2} WANG Pei^{1,2}
ZHAO Runmao^{1,2} HU Lian^{1,2} WANG Pei³ SUN Xuantian⁴

(1. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2. State Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing 100083, China

3. Intelligent Equipment Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China

4. Shandong Academy of Agricultural Machinery Sciences, Jinan 250100, China)

Abstract: In order to improve the online yield measurement accuracy of grain combine harvester and suppress the interference of body tilting and mechanical vibration during the yield measurement process, a pressure-type grain yield measurement system based on tilting angle and vibration compensation strategy was developed. The system consisted of a pressure-type grain yield measurement device, a GNSS positioning module, a data processor and a host computer. Firstly, a mathematical model of grain yield monitoring was constructed based on the functional relationship between grain yield and sensor pressure, inclination, vibration and humidity, and a test rig for grain yield monitoring was built to optimize the structural parameters of the device through orthogonal test combined with response surface analysis. The effects of the number of pressure sensors, the mounting position of the vibration absorber and the inclination angle of the device on the measurement error were investigated, and the optimal parameter combinations were determined to be five pressure sensors, the 3rd reference position (175 mm from the left slot wall) for the vibration absorber and the 21° inclination angle of the device, respectively. The results of univariate (flow rate change) and multivariate (flow rate, inclination angle and vibration

收稿日期: 2025-05-12 修回日期: 2025-07-23

基金项目: 山东省重点研发项目(2022SF020202)、广州市基础与应用基础研究专题青年博士“启航”项目(SL2023A04J00077)和湖南省科技厅重大项目(2023NK1020)

作者简介: 黄培奎(1990—),男,高级工程师,博士,主要从事多源信息融合定位与感知技术研究,E-mail: pkuang@scau.edu.cn

通信作者: 胡炼(1984—),男,研究员,博士,主要从事智能农机装备和无人农场技术研究,E-mail: lianhu@scau.edu.cn

change) tests showed that the yield measurement error of 20 groups of tests under different working conditions was stably controlled within 3%; the results of field tests showed that the average yield measurement error in actual operation was 3.41%, with a maximum of no more than 4%, which verified that the system can effectively inhibit the interference of the tilting of the vehicle body and the vibration of the machinery on the accuracy of the measurement of the yield and provide an effective technical support to obtain the information of the distribution of the yield of the precision agriculture. The system can effectively suppress the interference of body tilt and mechanical vibration on yield measurement accuracy, and provide effective technical support for the acquisition of precise agricultural yield distribution information.

Key words: grain combine harvester; online yield monitoring; pressure sensors; inclination and vibration compensation

0 引言

在农业生产中,谷物收获过程中的产量分布信息是精准农业管理的重要依据,而谷物在线测产技术是实现该目标的关键手段。该技术可帮助农业从业者了解田间农作物的生长状况,并指导田间水肥、土壤贫瘠肥沃状态和病虫害分布等区域差异性管理,同时为规划和制定生产管理策略提供了参考依据,对农业生产向智能化发展具有推动作用^[1-3]。

国内外对谷物在线测产技术的研究主要聚焦于测产方法和测产信号处理。测产方法以收获各个环节中谷物产量存在差异性为出发点,在谷物流动(输送)的路线上,测产传感器可安装在任一环节进行谷物产量监测^[4]。因此,针对收获环节中谷物联合收获机的不同结构,例如粮箱、刮板式输粮管等,设计传感器直接获取谷物质量变化;或根据收获流程与产量相关性,如体积、扭矩和功率等,构造函数关系,以建立产量预测模型^[5-6]。因此,谷物测产方法可分为动态称量法^[7-9]、冲击力测量法^[10]、体积测量法^[11]和射线测重法^[12]等。当前测产方法较为丰富,但存在精度不稳定问题^[13-17],严重制约了在精准农业中的大规模推广应用,这是当前研究面临的重要问题。

测产信号处理主要是对现有测产方法进行误差修正和数据处理。由于谷物测产是一个受多因素影响的过程,需针对该过程存在的机器振动、田间颠簸倾斜、谷物含水率变化等进行修正补偿,以减少不确定因素的影响;进而将测产数据转化为产量图,但需考虑存在的填充时间和时间延时,定位数据误差等^[18]。胡均万等^[19]提出了双板差分冲击式,采用了差分算法来补偿测产数据的零点偏移。韩帅军等^[20]采用 Mallat 算法进行小波分解,有效地滤除谷物流量传感器输出信号中的高频噪声,并转化为可用信号,试验结果表明该重构分解算法是有效的。刘仁杰等^[21]对冲击式谷物流量传感器的预测模型、

空间变异性分析进行深入研究,以还原田间产量分布。以上研究说明了测产过程中采用软硬件结合的手段可一定程度上减小误差,所以针对田间车身颠簸和机器振动两大影响因素,本文采取软硬件结合手段,提出倾角与振动补偿策略。

此外,谷物在线测产技术在可行性方面需考虑产量传感器安装改造难度、可移植性、成本代价和粮仓容积损失等问题;在通用性方面需考虑各地区所使用的联合收获机的输粮结构差异性并针对国内通用输粮结构进行设计;在稳定性方面需考虑收获过程中谷物测产受到收获机车身倾斜、机械振动影响精度的问题,针对性地设计各因素对应补偿策略^[22-24]。

综上所述,本文以洋马 YH1180 型谷物联合收获机为试验平台,针对目前国内应用较多的输粮结构缺乏适配的测产装置与谷物测产过程中收获机作业时车身倾斜、机械振动影响精度的问题,设计一种垂直螺旋式输粮结构测产装置,提出一种倾角与振动补偿策略,用于修正压力式产量传感器,开发谷物联合收获机压力式在线测产系统,实现谷物收获过程中产量信息的实时获取。

1 谷物产量监测原理

压力式谷物在线测产系统由测产装置、GPS 定位模块、数据处理器和上位机组成,系统总体结构图如图 1 所示。工作原理如下:在开始收获作业之前,提前设置收获机的割幅宽度、通信参数、延迟时间和采集频率等初始参数。当系统根据无人驾驶系统共享的割台工作离合状态检测到割台开始工作时,测产系统即启动产量监测,同时通过定位模块记录收获机的实时作业位置和前进速度。谷物经脱粒、清选后,由垂直螺旋式输送机输送至出粮口,并通过缓冲导流结构传送至谷物流传感器检测区。系统利用压力传感器、倾角传感器和含水率传感器实时获取压力信号、倾角信号和谷物含水率信息,这些信息经

谷物产量模型算法处理后,实时在人机交互界面上可视化显示产量信号曲线。作业结束后,上述提及的数据将被储存,以便后续处理。系统工作流程如图 2 所示。

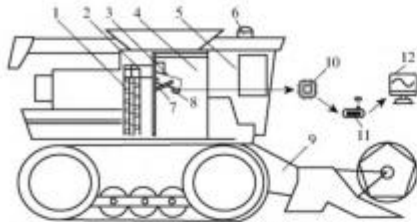


图 1 压力式谷物在线测产系统总体结构示意图

Fig.1 Schematic of pressure grain on-line yield measurement system

1. 输粮管 2. 出粮口 3. 压力式谷物测产装置 4. 粮仓 5. 驾驶室 6. GPS 定位模块 7. 倾角传感器 8. 压力传感器 9. 割台 10. 数据处理器 11. 无线通信设备 12. 上位机

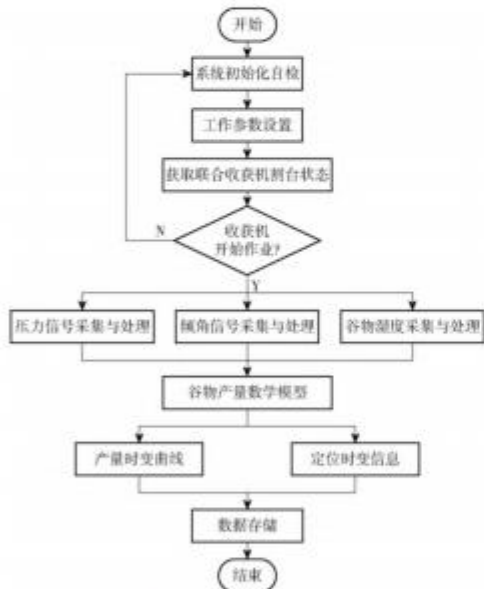


图 2 系统工作流程图

Fig.2 System working flowchart

倾角与振动补偿策略是针对车身颠簸和机器振动两大干扰因素提出的,策略重点在于数学关系的推导和数学模型的建立。为了构建加入倾角与振动动态补偿后的谷物产量与压力之间的数学模型,需对谷物测产装置进行结构和力学分析。推导过程如下:选取谷物测产装置导流槽俯视方向为参考平面,该平面包括谷物流动区和谷物流压力检测区;将检测区域平分为 5 个等宽区域,作为 5 个压力检测参考位置,标号 1~5,设该平面左边缘坐标为 0 mm,右边缘坐标为 350 mm,参考位置 1~5 的坐标分别为

35、105、175、245、315 mm;谷物可以视为一种特殊的颗粒流体,并将其看作是一个连续的介质^[25]。因此,谷流经由输粮口到达缓冲板,随后稳定地流入流动区域,并以稳定的速度通过压力检测区;在某个时刻,压力传感器组采集到的谷流长度为 d ;为了检测到整段谷流,由流速和长度计算得出时间间隔 Δt ,压力传感器组按 Δt 进行分段检测,持续累加获得整段谷物的产量,如图 3a 所示。

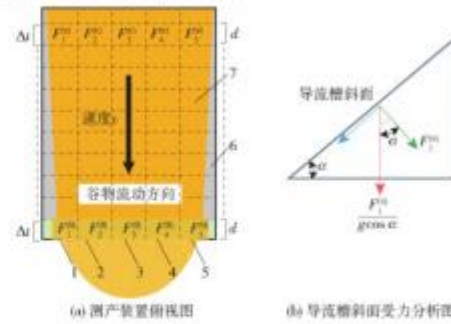


图 3 系统原理图

Fig.3 System schematics

1. 第 1 参考位置 2. 第 2 参考位置 3. 第 3 参考位置 4. 第 4 参考位置 5. 第 5 参考位置 6. 导流槽俯视方向横截面 7. 谷物流俯视方向横截面

在时间间隔 Δt 内,压力传感器所测得的 5 个参考位置的压强为 $F_1^{(n)}, F_2^{(n)}, F_3^{(n)}, F_4^{(n)}, F_5^{(n)}$,该压力方向垂直于导流槽斜面,因此,需加入装置实时倾角值(即导流槽斜面角度 α)修正模型,将每一时间间隔内的谷物质量转换为该时间间隔内产量 M_n ,如图 3b 所示。

第 1 个参考位置在时间间隔 Δt 内经过的谷物质量为

$$m_1^{(n)} = \frac{F_1^{(n)}}{g \cos \alpha} \quad (1)$$

式中 g ——重力加速度, m/s^2

第 5 个参考位置在时间间隔 Δt 内经过的谷物质量为

$$m_5^{(n)} = \frac{F_5^{(n)}}{g \cos \alpha} \quad (2)$$

压力传感器每次采集之间的时间间隔为

$$\Delta t = \frac{d}{v} \quad (3)$$

式中 v ——谷流流速

T 时间段内采集次数 n 为

$$n = \frac{1}{T} \quad (4)$$

第 n 个时间间隔 Δt 经过压力检测区的谷物质量为

$$M_n = m_1^{(n)} + m_2^{(n)} + m_3^{(n)} + m_4^{(n)} + m_5^{(n)} \quad (5)$$

因此, T 时间段内流过的谷物产量质量 M 为

$$M = \sum_{i=1}^n M_i \quad (6)$$

《机械设计手册》^[26] 中螺旋输送机流量 Q 计算公式为

$$Q = \frac{\pi}{24} [(D + 2\lambda)^2 - L^2] \varphi p \gamma C \times 10^{-10} \quad (7)$$

式中 D ——输送机叶片外直径, mm
 L ——输送机叶片内直径, mm
 p ——输送机叶片螺距, mm
 λ ——输送机叶片与外壳间隙, mm
 κ ——输送机转速, r/min
 φ ——输送谷物籽粒时的充满系数, 一般取 0.3~0.4
 γ ——谷物籽粒单位容积质量, kg/m³
 C ——输送机倾斜输送系数

当螺旋输送机结构确定后, 其结构参数 (D 、 d 、 p 、 λ)、 φ 、 γ 、 C 均为定值, 故流量 Q 与转速 n 成正比。谷物联合收获机正常作业时, 发动机驱动功率恒定, 使垂直螺旋输送机转速 n 稳定, 确保输送阶段谷物流速稳定; 此外, 出粮口缓冲板将谷物流由高速输送转化为缓速滑落, 使其以恒定速度流经压力检测区域。因此, 动力驱动的稳定性和机械结构 (缓冲板) 的导流作用共同保证了检测区域谷流速度恒定。

针对装置振动干扰引发的噪声信号问题, 安装受力反向的振动补偿传感器 (简称消振器) 于压力传感器组中间正下方 (图 4a), 实现噪声实时抵消。

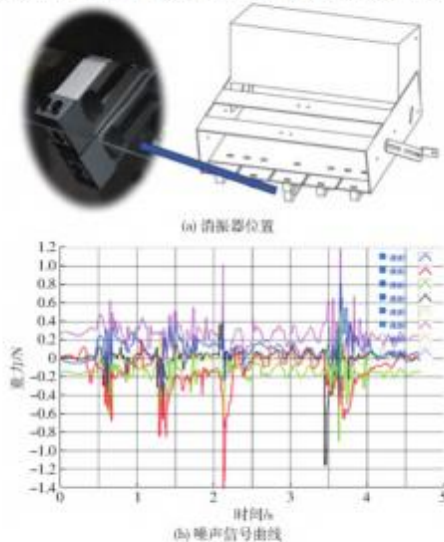


图 4 干扰信号采集

Fig. 4 Interference signal acquisition

基于振动干扰信号分析试验的采集信号表明: 在不同程度振动激励下, 各传感器振动干扰信号趋势一致; 如图 4b 所示, 通道 4 幅值特性接近全通道平均水平, 故选取该通道信号作为补偿基准 (消振传感器信号), 通过信号叠加实现振动干扰的动态消除。根据以上分析对谷物产量数学模型进行修正, 加入振动干扰抵消处理后第 1 个参考位置在时间间隔 Δt 内经过的谷物质量为

$$m_1^{(i)} = \frac{F_1^{(i)} - \beta}{g \cos \alpha} \quad (8)$$

式中 β ——振动补偿传感器的噪声信号

国家谷物入库的标准含水率为 13%, 需将湿基谷物转化为干基谷物, 因此, 结合粮食含水率传感器所测得谷物籽粒平均含水率进行换算, 即可获得标准入库产量 M_k , 即

$$M_k = \frac{M(1 - R_H)}{1 - 0.13} = \frac{M(1 - R_H)}{0.87} \quad (9)$$

式中 M ——湿基谷物质量, kg

R_H ——谷物籽粒平均含水率, %

综上所述, 加入倾角、振动和含水率参数, 可得出倾角与振动动态补偿的压力式谷物产量数学模型的具体表达式, 即第 n 个采集时间间隔内流过的谷物产量质量 M_n 为

$$M_n = \frac{F_1^{(n)} + F_2^{(n)} + F_3^{(n)} + F_4^{(n)} + F_5^{(n)} - 5\beta}{g \cos \alpha} \cdot \frac{1 - R_H}{0.87} \quad (10)$$

2 谷物在线测产系统设计

2.1 硬件选型及设计

谷物联合收获机压力式在线测产系统由测产装置机械单元、信号采集单元和数据传输处理单元组成。首先, 测产装置机械单元包括缓冲板、导流槽、传感器及装置与谷物联合收获机连接的固定组件; 其次, 信号采集单元包括谷物流信号采集过程中所采用的 AT8501 型悬梁式压力传感器、维特三轴倾角传感器、探针型在线粮食含水率传感器、GPS 定位模块和用于压力数据处理的 TDA-04A 系列数字处理器, 精度和工作温度均适用于大部分收获机田间收获场景; 最后, 数据传输处理单元包括无线数据传输设备和上位机界面, 如图 5a 所示。其中, 为适应国内通用输粮结构、粮仓容积损失最小化、低成本和易安装易维护的要求, 对关键部件压力式测产装置进行设计, 其结构主要由缓冲板、导流槽、倾角调节组件、悬梁式压力传感器组、承重片和固定组件等组成, 并进行了基础硬件测试, 功能正常, 安装于谷物联合收获机的粮仓中。该压力式谷物测产装置实物

图如图 5b 所示。

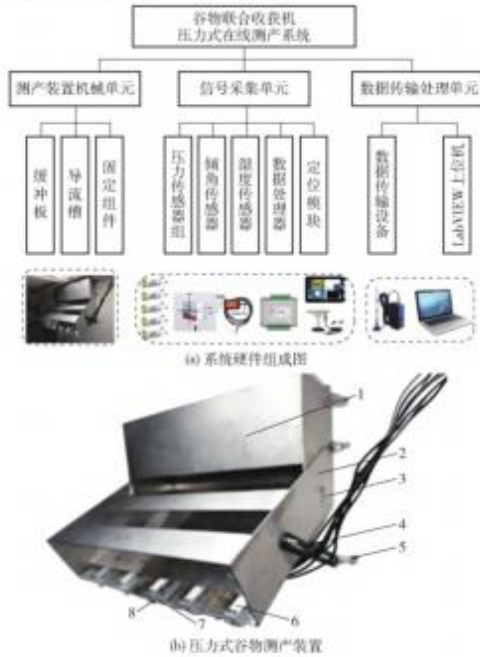


图 5 系统硬件

1. 缓冲板 2. 导流槽 3. 倾角圆弧导向 4. 可调长孔角码
5. 角码 6. 压力承重片 7. 悬梁式压力传感器 8. 消振传感器

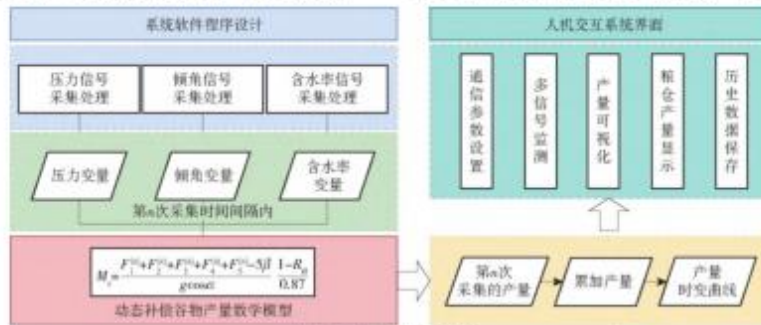


图 6 系统软件流程图

Fig. 6 System software flowchart

3.2 试验

3.2.1 试验条件与方法

为确定谷物在线测产装置最优结构参数,探究各参数对压力式谷物在线测产系统监测精度的影响规律,在试验台架上开展装置结构优化试验,采用 Box - Behnken 响应曲面试验设计方法。选取谷物在线测产装置倾角、压力传感器数量和消振器安装位置为试验因素,以压力式在线测产系统测产误差为试验指标,开展三因素三水平的 Box - Behnken 响

2.2 软件设计

在完成系统硬件选型及设计后,针对软件功能开发设计了多源信号(压力、倾角、含水率)采集与处理等功能模块,各模块数据经由基于谷物产量模型的上位机处理融合生成产量时变曲线,并与定位信息相匹配。上位机软件主要由初始化设置、信号处理监测、数据存储等模块组成,实现监测数据的集中存储、实时处理与分析,通过可视化曲线动态呈现监测结果。软件流程图如图 6 所示。

3 系统装置结构参数优化试验

3.1 试验台搭建

谷物产量监测试验台如图 7 所示,以洋马 YH1180 型谷物联合收获机输粮结构和粮仓按 1:1 原型设计,主要由铝型材框架、垂直螺旋输粮管、接料箱、称量器、进料斗、三相交流电机、电机变频器、测产装置、固定背板等组成。框架尺寸为 1 000 mm × 1 000 mm × 1 600 mm,背板开口为 150 mm × 340 mm,垂直螺旋输粮管的外径为 165 mm,整体高度为 1.5 m,内部输送器约为 160 mm,由功率 3 kW、转速 1 400 r/min 的三相交流电机驱动,采用工作频率 0 ~ 50 Hz 电机变频器实现功率调节,装置水平倾角 8° ~ 24° 可调。

应曲面试验,因素编码如表 1 所示。

在参数范围确定时,考虑到谷物在线测产装置凹型导流板底面宽度、压力传感器尺寸等成本,本试验中压力传感器数量最多取 5 个。消振器位置如图 3a 装置俯视图的参考位置 1、2、3,根据前文理论分析可知,参考位置 1、2、3 分别位于压力检测区的不同位置,振动对其存在不同于干扰影响,因此,需探究安装消振器的最佳位置,达到较好的振动补偿效果。为保证谷物在装置内流动顺畅,结合装置可调节

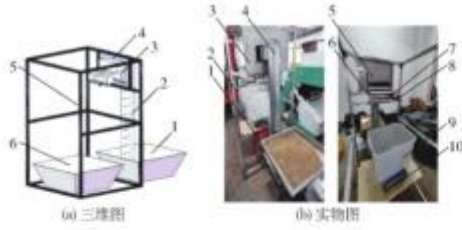


图7 谷物产量监测试验台

Fig.7 Experiment platforms of grain yield monitoring system

1. 进料斗 2. 铝型材框架 3. 固定背板 4. 垂直螺旋输粮管
5. 测产装置 6. 倾角传感器 7. 压力传感器组 8. 消振传感器
- 9,10. 模拟粮仓部分

表1 试验因素编码

Tab.1 Experimental factors codes

编码	装置倾角 A/(°)	传感器数量 B/个	消振器位置 C
-1	8	3	1
0	16	4	2
1	24	5	3

倾角设计的倾角范围,确定倾角变化范围为 8°~24°。

3.2.2 结果与分析

根据 Design-Expert 软件中的响应曲面法进行试验方案设计与数据分析,试验共计 17 次,试验方案与结果如表 2 所示。并进一步利用 Design-Expert 软件进行多元回归拟合和方差分析,如表 3 所示,谷物产量监测系统测产误差回归模型的显著性水平 $P < 0.05$,表明该回归模型显著性水平高,失拟项显著性水平 $P > 0.05$,表明回归模型拟合效果好。

由表 3 方差分析可以判断各参数对压力式谷物在线测产系统测产误差的影响程度,影响因子 A、B、C、AB、BC、 B^2 、 C^2 对谷物在线测产系统测产误差影响显著,其他因子影响不显著,这说明装置倾角、传感器数量和消振器位置对测产误差影响显著,且装置倾角与传感器数量以及传感器数量和消振器位置因素之间存在交互影响。该系统测产误差回归模型

表2 正交试验方案与结果
Tab.2 Orthogonal test program and results

试验序号	试验因素			测产误差 Y/%
	A/(°)	B/个	C	
1	8	3	2	5.71
2	24	3	2	2.99
3	8	5	2	3.74
4	24	5	2	2.03
5	8	4	1	5.37
6	24	4	1	3.64
7	8	4	3	3.77
8	24	4	3	2.11
9	16	3	1	4.89
10	16	5	1	3.23
11	16	3	3	2.75
12	16	5	3	2.03
13	16	4	2	4.31
14	16	4	2	4.27
15	16	4	2	4.09
16	16	4	2	4.29
17	16	4	2	4.38

表3 回归模型方差分析

Tab.3 Analysis of variance of regression model

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	19.39	9	2.15	67.04	<0.000 1
A	7.64	1	7.64	237.81	<0.000 1
B	3.52	1	3.52	109.65	<0.000 1
C	5.23	1	5.23	162.79	<0.000 1
AB	0.255 0	1	0.255 0	7.93	0.025 9
AC	0.001 2	1	0.001 2	0.038 1	0.850 8
BC	0.220 9	1	0.220 9	6.87	0.034 3
A ²	0.024 6	1	0.024 6	0.766 6	0.410 3
B ²	1.39	1	1.39	43.16	0.000 3
C ²	0.926 2	1	0.926 2	28.81	0.001 0
残差	0.046 5	4	0.011 6		
失拟	0.178 5	3	0.059 5	5.12	0.074 3

$R^2 = 0.988 5$,表明回归模型拟合效果好。剔除不显著因素,得到测产误差的多项式回归方程

$$Y = 4.27 - 0.977 5X_1 - 0.663 75X_2 - 0.808 75X_3 + 0.235X_2X_3 - 0.574X_2^2 - 0.469X_3^2 \quad (11)$$

式中 X_1 、 X_2 、 X_3 ——因素编码值

当消振器的位置为 2(第 2 参考位置)时,装置倾角和传感器数量对测产误差的影响如图 8a 所示。传感器数量与压力检测精度相关,随着传感器数量增

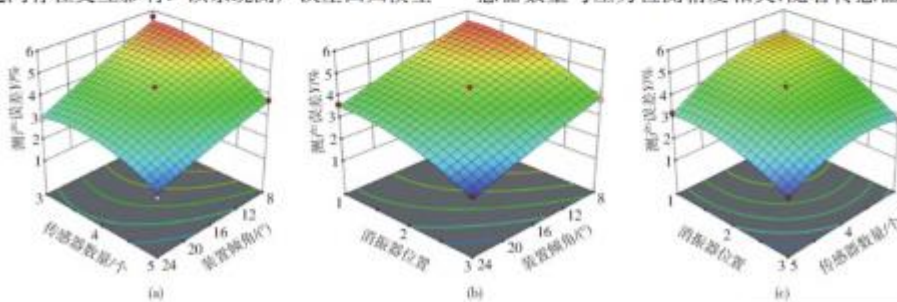
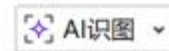


图8 各因素交互作用对测产误差影响的响应曲面

Fig.8 Effects of factors on yield measurement error



加,测产误差减小;装置倾角决定谷物流速,随着倾角减小,流速趋近于 0,导致谷物在出粮口不断堆积,使测产误差呈上升趋势且占据主导地位,即传感器数量增加不足以抵消装置倾角过小带来的误差。因此,需设置合理装置倾角以保证谷物流动顺畅,并在合理倾角下尽可能增加传感器数量,降低测产装置误差。

当传感器数量为 4 个时,装置倾角和消振器位置对测产误差的影响如图 8b 所示。消振器位置设置需考虑实际作业振动对装置不同位置的干扰差异,以其检测的干扰信号修正各传感器时可能存在补偿不足,因此需确定最佳消振器位置以降低测产误差。随着消振器位置越接近压力检测区中心(第 3 参考位置),装置测产误差呈下降趋势。同时,装置倾角的影响仍占主导地位,消振器位置靠近中心不足以抵消装置倾角变化带来的误差。

当装置倾角为 16° 时,传感器数量和消振器位置对测产误差的影响如图 8c 所示。分析表明,随着传感器数量增大和消振器位置向第 3 参考位置靠近,测产误差呈下降趋势,两者影响效果均不显著且存在交互影响。

由以上响应面分析可知,装置倾角、消振器位置和传感器数量对测产误差会产生显著的交互作用影响。应用 Design-Expert 软件对回归模型进行该目标下的优化求解,得到最佳参数组合,优化约束条件为: $\min Y(A, B, C)$, 变量区间为: $8^\circ \leq A \leq 24^\circ$, $3 \leq B \leq 5$, $1 \leq C \leq 3$ 。得到最佳结构参数组合为: 5 个传感器,第 3 消振器位置,装置倾角 21° ,此参数组合下该系统测产误差为 1.603%。

4 验证试验

4.1 模拟台架验证试验

在最优结构参数组合下对该系统测产效果进行台架试验验证,验证倾角与振动补偿策略对测产精度提高和测产过程中车身倾斜与机械振动干扰抑制的作用。由前述理论可知,谷物测产过程受到多个因素的影响,其中流量、倾角及振动变化会不同程度地影响到谷物测产结果,因此,采用控制变量法,开展单变量和多变量台架试验,进行对比分析,验证在不同条件下系统的测产效果和鲁棒性。台架试验现场如图 9 所示。

验证试验包含 10 组静态试验(单变量:流量变化)和 10 组动态试验(多变量:流量、倾角及振动变化),选取增科新选丝苗 1 号水稻作为试验谷物样本,样本平均含水率为 12%。变量控制:流量变化由电机变频器(20~50 Hz)频率阶跃变化实现(频率下限 20 Hz 保障谷物正常输送);倾角与振动通过



图 9 台架试验

Fig. 9 Test stand test site

振动台架产生,并采用维特 WTVB01-485 型振动传感器测得的振动位移(振幅)定量表征振动强度,同步监测倾角变化。通过以下试验步骤模拟复杂工况:系统初始化,进料斗装载含水率均匀的谷物样本;逐组开展试验,同步记录测产装置与台架粮仓的产量曲线数据,单变量和多变量试验结果如表 4、5

表 4 单变量(流量变化)试验结果

Tab. 4 Univariate (flow rate change) test results

组别	电机频率	测产装置 测量值/g	台架粮仓 真实值/g	相对误差/ %
	20~50 Hz 阶跃变化次数			
1	2	21 160.4	20 872.3	1.36
2	2	20 822.2	20 462.4	1.73
3	2	20 715.0	20 269.9	2.15
4	2	20 839.0	19 946.1	2.37
5	2	20 402.4	20 159.1	1.19
6	3	20 966.6	20 661.1	1.46
7	3	20 805.1	20 418.7	1.86
8	3	20 866.9	20 365.0	2.41
9	3	20 820.6	20 347.9	2.27
10	3	20 457.6	20 109.7	1.70
平均相对误差				1.85

表 5 多变量(流量、倾角及振动变化)试验结果

Tab. 5 Multi-variable (flow, inclination and vibration changes) test results

组别	电机频率	测产装置 测量值/g	台架粮仓 真实值/g	相对 误差/%
	20~50 Hz 阶跃变化次数			
1	3	20 286.2	19 998.4	1.42
2	3	20 495.2	20 242.2	1.23
3	3	20 173.3	19 793.9	1.88
4	3	20 444.5	20 022.2	2.07
5	3	20 992.0	20 614.0	1.80
6	3	21 228.2	20 432.8	3.75
7	3	21 028.6	20 386.2	3.00
8	3	21 040.1	20 384.1	3.12
9	3	20 625.0	19 876.3	3.60
10	3	20 668.7	20 036.4	3.00
平均相对误差				2.50

所示,进一步将该测产系统获取的产量变化数据进行处理,得到台架粮仓与测产装置的产量曲线图和实时误差如图10、11所示。

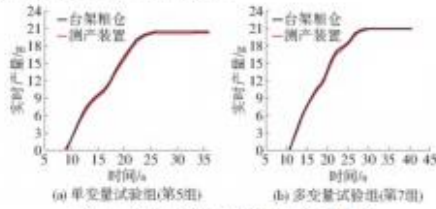


图10 台架粮仓与测产装置产量曲线

Fig. 10 Yield profiles of bench grain silo and yield measurement device

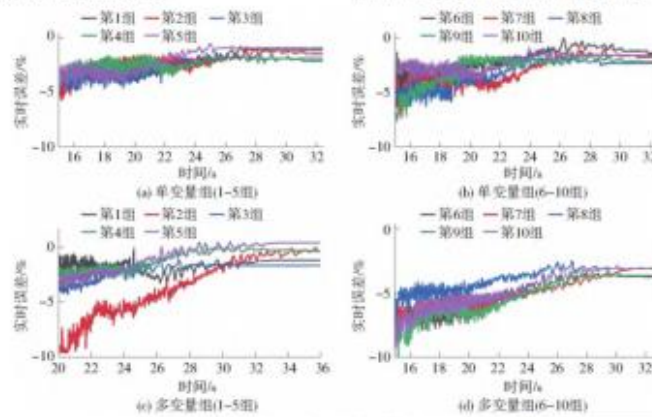


图11 实时误差曲线

Fig. 11 Real-time error graphs

误差均为从大到小的变化趋势,是由于测产前段谷物流总量小,即基数小,相等误差产量下,实时误差变大,因此随产量累积,实时误差呈现下降趋势。其中,系统整体测量值略高于真实值,源于采集时间间隔偏小导致的压力重复检测,但该偏差可通过优化谷物流速参数进一步修正。综上,单变量与多变量试验数据证实,补偿策略显著提升了测产系统对车身倾斜、机械振动及流量波动的抗干扰能力,动态条件下误差稳定低于3%,满足谷物产量监测系统对测产精度的设计要求。

4.3 田间验证试验

田间试验平台选择洋马 YH1180R-4LZ-6.0A (G4) 型全喂入收获机,如图12a所示。在该机器的粮仓输粮口处安装部署该压力式谷物在线测产装置,装置最低位置至粮位传感器的垂直距离约为10 cm,可占用粮仓较少容积,如图12b所示。

田间试验于2024年11月,在广东省广州市增城区朱村农场的试验田块开展,试验水稻品种为增科新选丝苗1号。试验过程中,位于粮仓底部位置

4.2 台架试验结果分析

台架试验结果表明,基于倾角与振动补偿策略的测产系统在复杂工况下表现出显著稳定性。单变量(流量不规则变化)静态试验中,测产平均相对误差为1.85%,实时误差曲线显示所有组别误差均稳定在2.50%以内,产量曲线与真实值同步性良好(如第5组),验证了系统对流量突变的鲁棒性。多变量(流量、倾角及振动变化)动态试验中,平均相对误差为2.50%,最大误差未超过3.00%(第7组),虽较单变量误差增加1%~2%,但误差波动始终受控,表明倾角振动补偿策略有效抵消了噪声干扰,满足复杂工况下的精度需求。此外,各组的实时



图12 装置安装图

Fig. 12 Installation diagrams of device

1. 螺旋输送机 2. 输粮口 3. 粮位传感器 4. 倾角传感器
5. 粮仓 6. 谷物含水率传感器

的谷物含水率传感器记录的全程谷物平均含水率为19.4%。洋马联合收获机的喂入量为6.0 kg/s,割幅为2.0 m;试验田块长77 m,宽55 m,电子计数台

秤型号为乐祺 LQ-T1, 量程为 50 kg, 精度为 ±1 g。

试验现场如图 13a 所示, 在缓冲板与导流槽的作用下, 原本发散状的谷物呈现缓速成流态, 流动畅通, 与设计预期一致; 在田间收获场景下, 振动传感器测得平均振动位移为 1.112 mm, 装置整体保持稳定。图 13b 为收获机的喂入量最大时装置谷物流动情况, 可见流量增大, 但未出现堵塞情况, 流动顺畅。



图 13 测产装置流动实况图

Fig. 13 Flow fact sheets for yield measurement devices

通过设置不同收割幅宽, 验证谷物测产装置的田间试验结果对田间真实产量实时变化测量的准确性, 采用多组小田块段的试验方式分组进行。即把试验田划分出 3 组全幅宽为 2 m、长度为 75 m, 以及 3 组半幅宽为 1 m、长度为 75 m 的试验组, 共计 6 组; 每组试验结束后把收获机开到田头卸粮, 记录收获的谷物质量, 并保存系统测产数据。

考虑到收获机内部脱粒等输送路线上可能存在堆积会导致产生测产异常点, 本文采用反距离加权插值法 (Inverse distance weighting, IDW) 对实时产量数据异常值进行滤除。该方法是基于空间邻近性通过已知点的观测值估算未知点的值, 计算公式为

$$\hat{z}_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{z_i}{d_i^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}} \quad (12)$$

式中 \hat{z}_0 ——未知点的估算值
 z_i ——第 i 个已知点的观测值
 d_i ——未知点与第 i 个已知点的欧氏距离
 p ——距离衰减系数 (通常 $p \geq 1$)
 n ——参与插值的已知点数量

田间试验结果如表 6 所示。

表 6 田间试验结果
 Tab. 6 Field trial results

组别	幅宽/m	称量值/kg	测量值/kg	相对误差/%
1	2	35.100	36.395	3.69
2	2	44.050	45.509	3.31
3	2	46.350	47.653	2.81
4	1	37.250	38.736	3.99
5	1	25.400	26.105	2.77
6	1	40.200	41.769	3.90
平均相对误差				3.41

4.4 田间试验结果分析

由试验数据可知, 田间试验测产面积为 675 m²,

平均相对误差为 3.41%, 最小相对误差为 2.77%, 试验结果表明, 该系统在谷物联合收获机的真实作业环境下, 仍能准确地监测谷物产量实时变化情况, 验证了该补偿策略可有效抑制车身倾斜与机械振动对测产精度的干扰。

试验结束后, 系统及时存储系统采集的产量时变信息和北斗定位模块所记录的位置时变信息, 以便进一步处理。田内产量数据的采集可以理解联合收获机获取产量空间信息的时间顺序过程。为直观性地得出试验田块的产量分布情况, 利用位置时变信息对产量时变曲线进行等距离分段: 每行走 1 m 记录为一个产量格子, 全幅宽的每一个格子为 1 m × 2 m, 半幅宽的每一个格子为 1 m × 1 m, 计算出每组试验的所有格子的产量数值, 再结合格子面积换算成单产形式, 如图 14a 所示。使用科学绘图软

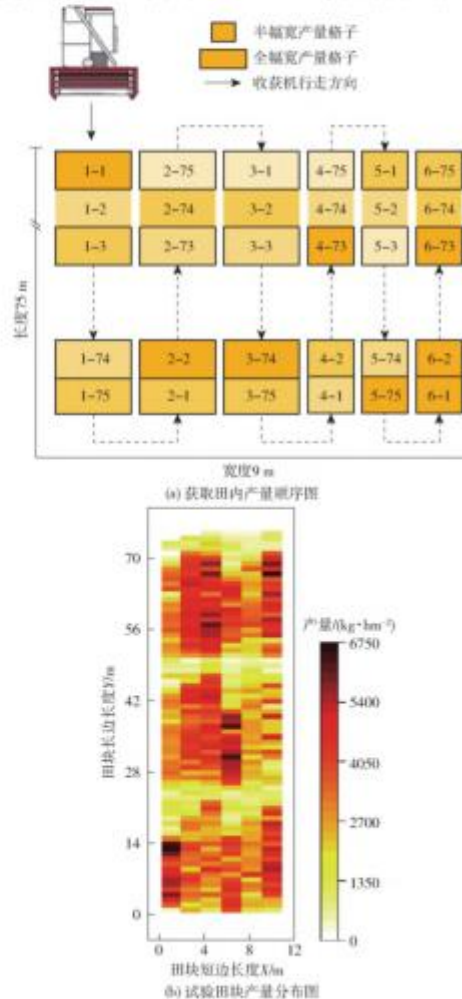


图 14 试验田块产量获取与分布

Fig. 14 Yield acquisition and distribution in test plots

件 Origin, 将 6 组试验所有产量格子按照经纬度位置进行颜色分级填充, 制作试验田块对应的谷物产量分布图, 如图 14b 所示, 为后续作业管理提供参考。

5 结论

(1) 针对联合收获机测产中车身倾斜与机械振动干扰问题, 设计了基于倾角与振动补偿策略的压力式谷物测产系统, 由压力式谷物测产装置、GPS 定位模块、数据处理器和上位机组成; 构建了融合压力、倾角、振动及含水率参数的谷物产量监测数学模型; 实现了谷物收获过程产量等信息的实时监测、可视化与存储。

(2) 搭建了谷物产量监测试验台, 通过正交试

验结合 Box - Behnken 响应曲面分析, 确定了测产装置最优结构参数组合为: 压力传感器数量为 5, 消振器安装位置为第 3 参考位置, 装置水平倾角为 21°。台架试验结果表明, 该补偿策略在单变量(流量变化)与多变量(流量、倾角及振动变化)工况下, 20 组试验测产误差均稳定控制在 3% 以内, 验证了该策略对车身倾角和机械振动干扰的有效抑制性能。

(3) 田间试验结果表明, 实际作业中平均测产误差为 3.41%, 最大不超过 4%, 验证了该补偿策略可有效抑制车身倾斜与机械振动对测产精度的干扰, 可为精准农业产量分布信息获取提供有效技术支持; 田间试验谷物产量监测数据经过分析处理, 绘制了产量分布图, 可为后续作业管理提供参考。

参 考 文 献

- [1] 耿端阳, 谭德蕾, 苏国梁, 等. 压力式谷物产量监测系统优化与试验验证[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 245 - 252. GENG Duanyang, TAN Delei, SU Guoliang, et al. Optimization and experimental verification of grain yield monitoring system based on pressure sensors[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(9): 245 - 252. (in Chinese)
- [2] 张立梅, 邢一春, 刘刚. 谷物产量空间分布数据的分析与处理[J]. 河北农业大学学报, 2003, 26(增刊1): 15 - 16, 23. ZHANG Limei, XING Yichun, LIU Gang. Analyzing and processing for cereal yield spatial distribution data[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2003, 26(Supp. 1): 15 - 16, 23. (in Chinese)
- [3] 周银章. 浅谈谷物联合收获机的在线测产技术[J]. 南方农机, 2022, 53(6): 62 - 64, 76. ZHOU Yinzhang. A brief discussion on online production measurement technology of grain combine harvester[J]. South Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 62 - 64, 76. (in Chinese)
- [4] KUTZBACH H D S H. Scientific challenges of grain harvesting[J]. CIGR Handbook of Agricultural Engineering Plant Protection Engineering, 1997, 3: 311 - 346.
- [5] HAN J, ZHANG Z, CAO J, et al. Prediction of winter wheat yield based on multi-source data and machine learning in China[J]. Remote Sensing, 2020, 12(2): 236.
- [6] MALDANER L F, DE PAULA L, CANATA T F, et al. Predicting the sugarcane yield in real-time by harvester engine parameters and machine learning approaches[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 181: 105945.
- [7] COLVIN T S. Automated weighing and moisture sampling for a field-plot combine[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1990, 6(6): 713 - 714.
- [8] SCHROCK M D, KUHLMAN D K, HINNEN R T, et al. Sensing grain yield with a triangular elevator[M]. ASA, CSSA, and SSSA Books, 1995: 637 - 650.
- [9] WAGNER L E, SCHROCK M D. Yield determination using a pivoted auger flow sensor[J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32: 409 - 413.
- [10] KORMANN G, DEMMEL M, AUERNHAMMER H. Development and examination of a testing stand for yield measurement systems in combine harvesters[C]// ASAE Conference: Agricultural Engineering, 1998: 1449.
- [11] NAVID H, TAYLOR R K, YAZGI A, et al. Detecting grain flow rate using a laser scanner[J]. Transactions of the ASABE, 2015, 58(5): 1185 - 1190.
- [12] ARSLAN S, INANC F, GRAY J N, et al. Grain flow measurements with X-ray techniques[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 26: 65 - 80.
- [13] 熊迎军, 周俊, 韦玮, 等. 嵌入式谷物流量传感器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(5): 39 - 46. XIONG Yingjun, ZHOU Jun, WEI Wei, et al. Design and experiment of grain mass flow sensor based on embedded system[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(5): 39 - 46. (in Chinese)
- [14] 赵湛, 雷朝鹏, 李洪昌, 等. 基于近红外光电效应的联合收获机谷物厚度测量方法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 381 - 386. ZHAO Zhan, LEI Chaopeng, LI Hongchang, et al. Grain thickness sensor for combine harvester grain flow measurement based on near-infrared spectroscopy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 381 - 386. (in Chinese)
- [15] 马鑫, 王熙, 王新忠, 等. 基于微波的产量监测传感器设计与试验[J]. 农机化研究, 2022, 44(12): 163 - 169.

- MA Xin, WANG Xi, WANG Xinzong, et al. Design and test of yield monitoring sensor based on microwave [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(12): 163-169. (in Chinese)
- [16] 孙言岩, 刘仁学. 基于微波雷达传感器的固体流量测量系统的研究 [J]. 现代仪器, 2009, 15(4): 45-47.
SUN Yanyan, LIU Renxue. Research of solid flow measurement based on MRS [J]. Modern Instruments, 2009, 15(4): 45-47. (in Chinese)
- [17] 曾宏伟, 雷军波, 陶建峰, 等. 基于单目视觉的谷物联合收获机产量测量方法 [J]. 农业机械学报, 2021, 52(12): 281-289.
ZENG Hongwei, LEI Junbo, TAO Jianfeng, et al. Yield monitoring for grain combine harvester based on monocular vision [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 281-289. (in Chinese)
- [18] 张漫, 邴继双. 谷物联合收割机测产数据中的误差分析与处理 [J]. 农业工程学报, 2003, 19(3): 144-148.
ZHANG Man, KUANG Jishuang. Error analysis and process of yield data collected by yield monitoring system of corn combine harvester [J]. Transactions of CASE, 2003, 19(3): 144-148. (in Chinese)
- [19] 胡均万, 罗锡文, 阮欢, 等. 双板差分冲量式谷物流量传感器设计 [J]. 农业机械学报, 2009, 40(4): 69-72.
HU Junwan, LUO Xiwen, RUAN Huan, et al. Design of a dual-plate differential impact-based yield sensor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 69-72. (in Chinese)
- [20] 韩帅军, 陈进, 鲍丙豪. 基于激光对射阵列的谷物流量监测装置研究 [J]. 农机化研究, 2020, 42(10): 64-69.
HAN Shuaijun, CHEN Jin, BAO Binghao. Research on grain flow monitoring device based on laser array [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(10): 64-69. (in Chinese)
- [21] 刘仁杰, 孙意凡, 张振乾, 等. 基于产量监测系统的小麦产量图生成与空间变异性分析 [J]. 农业机械学报, 2019(增刊1): 136-143.
LIU Renjie, SUN Yifan, ZHANG Zhenqian, et al. Wheat yield distribution map generation and spatial variability analysis based on yield monitoring system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Sup. 1): 136-143. (in Chinese)
- [22] 汪六三, 王儒敬. 联合收割机谷物流量传感器研究进展 [J]. 农业工程, 2020, 10(10): 25-28.
WANG Liusan, WANG Rujing. Research progress of grain flow sensor for combine harvester [J]. Agricultural Engineering, 2020, 10(10): 25-28. (in Chinese)
- [23] 王志海, 王沛东, 孟志军, 等. 谷物联合收割机测产技术发展现状与展望 [J]. 农机化研究, 2014, 36(1): 9-15.
WANG Zhihai, WANG Peidong, MENG Zhijun, et al. The summary and prospect of the grain combine harvester yield monitor system technology [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(1): 9-15. (in Chinese)
- [24] 吴迪, 储成高, 李海龙, 等. 谷物收获机测产系统研究现状 [J]. 山东农机化, 2024(6): 54-56.
WU Di, CHU Chenggao, LI Hailong, et al. Research status of grain harvester production measurement system [J]. Shandong Mechanization of Agriculture, 2024(6): 54-56. (in Chinese)
- [25] 毛欣. 组合式轴流装置谷物流运动模型与仿真研究 [D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2008.
MAO Xin. Modeling and simulation research on grain fluid motion of assembled axial-flow device [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2008. (in Chinese)
- [26] 成大先. 机械设计手册(第9版) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 15-17.

《农业机械学报》第十届编辑委员会

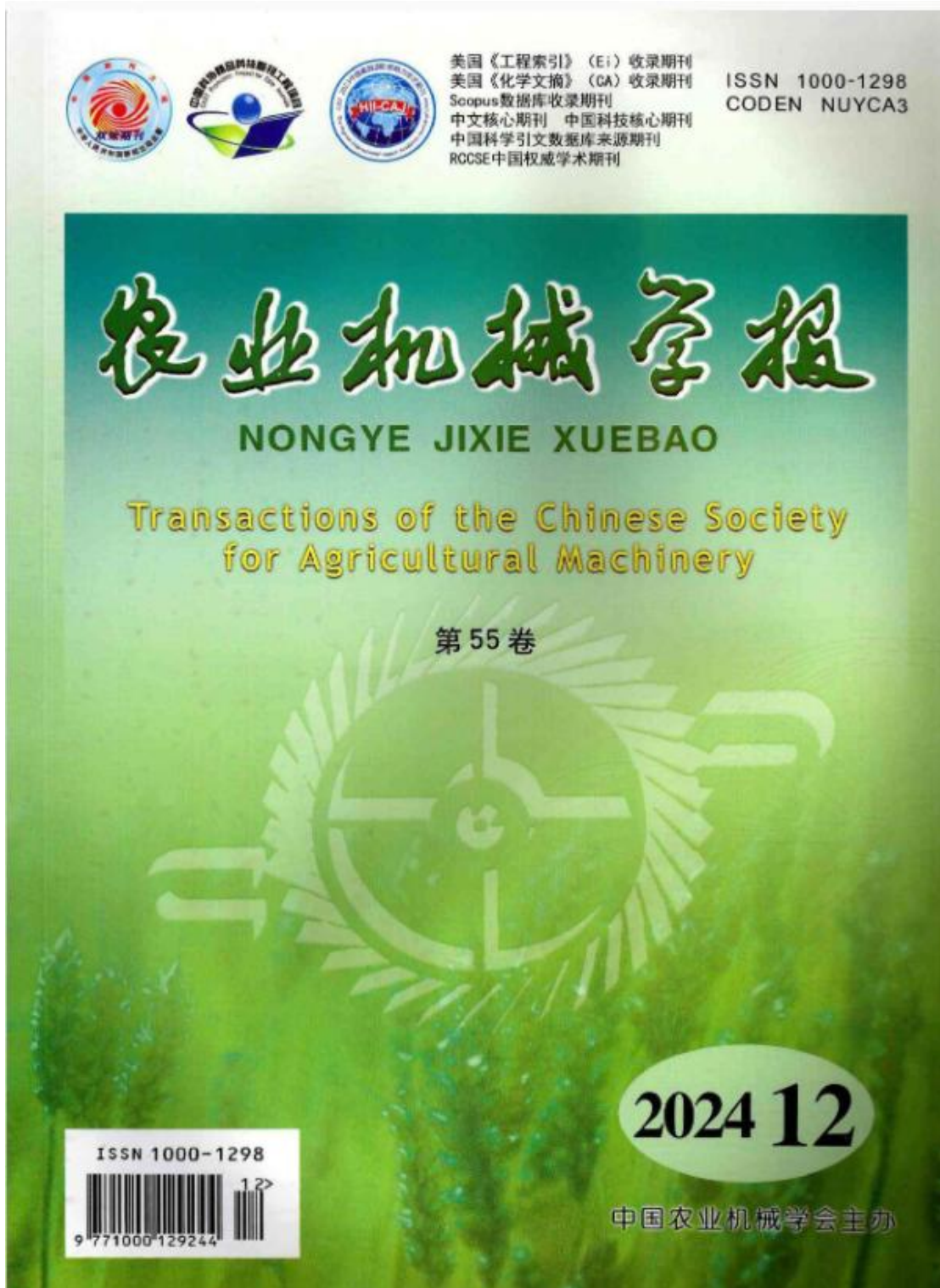
(按姓氏笔画为序)

- 荣誉主任委员：汪懋华 冯炳元 诸慎友
- 主任委员：罗锡文
- 主编：任露泉
- 执行主编：苑严伟
- 副主任委员：任发政 闫楚良 杜太生 李天来 吴善特 应义斌
陈志 陈学庚 赵春江 郑文聚 袁寿其 康绍忠
- 副主编：于海业 方宪法 李红 赵凤敏 韩鲁佳
版问编委：丁为民 马旭 王相友 毛罕平 毛恩荣 冯仲科 权龙
刘荣厚 刘瑞雯 江连洲 李萍萍 杨学军 何东健 张全国
陈巧敏 陈海涛 尚书旗 周志立 贾洪雷 姬长英
编委：丁幼春 王俊 王巧华 王东伟 王伟 王全九 王庆杰 王金武
王金星 王金峰 王德成 毛文华 付君 付强 朱艳 朱立学
朱孝勇 朱德泉 任建强 刘东 刘木华 刘立晶 刘成良 刘维展
刘燕德 衣淑娟 汤方平 许童羽 坎杂 杜小强 李久生 李云开
李民赞 李志合 李保国 李洪文 李景彬 李道亮 杨洲 杨万能
杨信廷 杨然兵 杨福增 何进 何勇 邹小波 汪小昂 汪若尘
沈明霞 宋正河 宋怀波 张永 张超 张漫 张兆国 张若宇
张领先 张德进 张慧春 陆明洲 陆海燕 陈立平 陈建能 陈黎卿
武传宇 苑进 尚松浩 易维明 金诚谦 周俊 周海燕 虎树杰
屈忠义 孟志军 赵立欣 赵武云 赵茂程 赵燕东 郝建军 胡炼
胡志超 胡建军 胡笑涛 俞高红 徐立友 徐立章 徐俊增 郭俊先
姬江涛 黄玉祥 黄东岩 曹成茂 曹光乔 崔清亮 蒋雪松 韩英
韩文登 韩志武 臧英 廖庆喜 薛金林 薛新宇
- 外籍编委：Abdul M Mouazen Ce Yang Chao Chen Chung Sun Ok
Ghulam Hussain Guoming Li Hak-jin Kim Jianfeng Zhou
Kang Kang Liangliang Yang Long He Manoj Karkee
Naiqian Zhang Nick Sigrimis Ning Wang Noboru Noguchi
Sergio Castro-García Siva K Balasundram Stavros G Vougioukas Wei Guo
Wenqiao Yuan Xin Sun Yubin Lan Yuzhen Lu
Zhiming Qi Zhiwei Zeng Zhou Zhang
- 青年编委：(第二届) 于丰华 王一甲 王韦韦 王纪章 王娟 尤泳 石林榕 卢彩云
申孝军 冯青春 冯德军 权辉 朱广飞 刘世晶 刘羊 刘孟楠
刘媛媛 齐江涛 闫祥海 关卓怀 孙红 孙良 李仙岳 李江波
李莱威 李斌 李臻 杨洋 杨晓 肖茂华 吴尚蓉 吴敏
邱威 何杰 汪六三 沈成 张开兴 张青松 张俊 张振国
张喜瑞 陆健强 陈雨 陈国平 陈桂鹏 陈皓锐 范军亮 林桂湖
金秀良 金鑫 周文琪 周脉乐 郑恩米 赵志桓 赵佳乐 赵博
胡少军 秦宽 徐文道 徐赛 奚小波 高筱钧 郭万金 郭文斌
唐汉 黄小毛 黄成龙 崔冰波 隋媛媛 韩长杰 韩科立 程金鹏
傅隆生 童俊华 温昌凯 鄂小安 赖庆辉 雷小龙 廖宜涛 翟长远
翟肇裕 熊俊涛 操信春 戴飞 魏忠彩
- 编辑部主任：陆海燕 编辑部副主任：韩英 虎树杰 编辑：唐金秋 陈亮 杨子怡 郭春春



封面设计：吴雨城

3.1. 基于两位置法与改进 STEKF 的农机航向角测量方法



基于 BLF 多约束反演控制的电动收获机分布式驱动控制方法研究	袁朝春 刘 敏 何友国 陈 龙 SHEN Jie 徐立章(212)
核桃机械振动采摘枝干能量传递特性研究	靳文停 赵金辉 庄腾飞 刘立品 赵恩龙 杨学军(221)
履带式马铃薯联合收获机辅助驾驶作业系统设计及试验	杨然兵 吕士亭 张 健 潘志国 王伟静 白翔宇(231)
苜蓿收割制粒机六边异形齿压扁辊设计与试验	金 琦 尤 泳 王德成 王海翼 胡鹏展 方宪法(239)
基于不同最大拱度位置翼型的高比转数混流泵叶轮优化	孙壮壮 朱亚东 张家敏 吕 宁 汤方平 陈松山(249)

农业信息化工程

基于光谱和纹理信息空间尺度优化的夏玉米冠层 EWT 反演模型	陈 洪 王亚昆 姚一飞 代 秦 陈子涵 刘 杨 李高良 胡笑涛(257)
基于多物候特征指数相关性迁移的冬小麦多年份分布信息识别	吴喜芳 化仕浩 张 莎 谷玲霄 马春艳 李长春(268)
基于改进 TransUNet 的黄土高原梯田作业区域提取方法	杨涵增 袁敏鑫 许翔虎 王 旺 杨江涛 刘志杰(278)
基于无人机多光谱植被指数与纹理特征的水稻叶绿素含量反演	祝清霞 朱艳秋 王爱臣 张立元(287)
基于无人机影像与机器学习的柑橘产量估测研究	吴立峰 徐文浩 裴青宝(294)
基于 DWT-DE 变换和 AHA-ELM 算法的水稻叶片氮含量预测方法	刘 湲 王雯琦 李子默 齐 缘 郭忠辉 许童羽(306)
基于一致性半监督学习的苹果叶片病斑分割模型研究	丁永军 杨文涛 赵一龙(314)
基于 YC-YOLO v7 模型的油菜幼苗株数识别方法	李兆东 章艳芳 江蕊红 赵前华 刘立超 张 甜 陈永新(322)
融合动态词典特征和 CBAM 的苹果病虫害命名实体识别方法	蒲 攀 刘 勇 张 蕊 王飞逸 苗园爽 谦 博 黄铝文(333)
基于渐进式学习和增强原型度量的小样本农作物病害识别方法	杜海顺 安文昊 张春海 周 毅(344)
基于改进 YOLO v5-StrongSORT 的屠宰场猪只精准计数方法	
基于两位置法与改进 STEKF 的农机航向角测量方法	何 杰 魏正辉 胡 炼 汪 冲 黄培奎 丁传奇(365)
	齐咏生 宋琳鹏 刘利画 苏建强 张丽杰(373)
基于卷积神经网络的移动机器人自适应光照增强单目视觉 SLAM 算法	陈久朋 陈泊帆 伞红军 赵龙云 彭 真(383)

农业水利工程

基于遗传算法的二维土壤水与作物生长耦合模拟模型构建和参数优化	张芳旭 王 军 韩宇平 贾冬冬 李久生(392)
--------------------------------	--------------------------

基于两位置法与改进 STEKF 的农机航向角测量方法

何杰^{1,2} 魏正辉¹ 胡炼^{1,3} 汪沛^{1,3} 黄培奎^{1,3} 丁帅奇¹


(1. 华南农业大学工程学院, 广州 510642; 2. 华南农业大学黄埔创新研究院, 广州 510700;

3. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642)

摘要: 针对单天线 GNSS 农机导航系统起步和低速时航向测量不准问题, 本文基于两位置法与改进强跟踪扩展卡尔曼滤波算法 (Strong tracking extended Kalman filter, STEKF) 进行农机航向测量技术研究, 设计一种适用于单天线 GNSS/IMU 融合的农机航向测量方法。采用两位置法测量高速作业农机航向, 基于 IMU 输出的 9 轴数据和 GNSS 输出的位置与速度信息, 提出改进强跟踪自适应矩阵 R STEKF 算法对农机低速行驶时的航向准确测量, 设计了基于两位置法与改进 STEKF 航向的一维卡尔曼滤波融合方法。以雷沃 M-1204 型拖拉机为试验平台, 进行了速度梯度变化工况下农机航向测量精度和稳定性验证试验, 结果表明, 在农机从静止状态起步, 经历包含直线和曲线的混合路段, 在速度 0.36~5.40 km/h 过程中, 本文提出的融合航向测量方法获取的航向角与双天线 GNSS 获取的航向角误差不得超过 0.50°, 表明本文方法适用于农机静止起步到低速运动状态下农机航向稳定获取, 提高了单天线农机导航起步和低速驾驶控制精度和稳定性, 可为高精度农机自主无人作业提供技术基础。

关键词: 农业机械; 导航; 两位置法; 改进 STEKF; 航向测量

中图分类号: S220; S24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2024)12-0365-08

OSID: 

Method for Measuring Heading Angle of Agricultural Machinery Based on Two-position Method and Improved STEKF

HE Jie^{1,2} WEI Zhenghui¹ HU Lian^{1,3} WANG Pei^{1,3} HUANG Peikui^{1,3} DING Shuaiqi¹

(1. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2. Huangpu Innovation Research Institute, South China Agricultural University, Guangzhou 510700, China

3. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: To solve the problems of low accuracy in heading measurement for single-antenna GNSS agricultural machinery navigation system at low speed and the difficulty of starting up, research on agricultural machinery heading measurement technology was conducted based on two-position method and improved STEKF. A suitable heading measurement method for GNSS/IMU fusion in single-antenna agricultural machinery was designed. The heading of high-speed agricultural machinery was measured by the two-position method, and the heading of low-speed agricultural machinery was measured by the improved STEKF algorithm based on the 9-axis data output by the IMU and the position and speed information output by the GNSS. A one-dimensional Kalman filter fusion method based on the two-position method and the improved STEKF heading was designed. The M-1204 tractor produced by Lovol was used as the experimental platform to verify the heading measurement accuracy and stability under speed gradient change conditions. The results showed that during the process of starting up from a stationary state and traversing mixed routes containing straight lines and curves at a speed of 0.36 km/h to 5.40 km/h, the heading angle obtained by the proposed fusion heading measurement method was within 0.5° of the heading angle obtained by the dual-antenna GNSS, indicating that the proposed method was suitable for stable heading acquisition of agricultural machinery in the state of starting up and low-speed movement, which improved the precision and stability of single-antenna agricultural machinery

收稿日期: 2024-04-24 修回日期: 2024-05-18

基金项目: 科技创新 2030—“新一代人工智能”重大项目(2021ZD0110902), 广东省科技计划项目(20230201)和华南农业大学黄埔创新研究院科研项目(2023GG004)

作者简介: 何杰(1985—), 男, 副教授, 博士, 主要从事智能农机装备和无人化农场技术研究, E-mail: hoogei@scau.edu.cn

通信作者: 黄培奎(1990—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事多源信息融合定位与感知技术研究, E-mail: pkhuang@scau.edu.cn

navigation and low-speed driving control and provided technical basis for high-precision agricultural machinery autonomous unmanned operation.

Key words: agricultural machinery; navigation; two position method; improved STEKF; heading measurement

0 引言

针对不同应用场景,可选择单天线定点、双天线定向和多天线定姿态等合适的全球卫星导航系统(Global navigation satellite system, GNSS)配置来满足需求。其中,双天线 GNSS + 载波相位差分技术(Real time kinematic, RTK)的组合以其航向稳定和定位精准已被广泛应用于农业生产等领域^[1-2]。无人农机有助于减少生产成本、提高综合收入^[3]。国内已有高校和企业取得了显著成果。如华南农业大学罗锡文团队的无人农场将双天线 GNSS 应用于各种农机的自动驾驶,实现了农业生产全程无人化作业^[4-5],相关企业推出了双天线 GNSS 和双天线 GNSS/INS(Inertial navigation system, 惯性导航系统)组合导航系统的农机辅助驾驶和自动驾驶套件^[6]。而双/多天线对 GNSS 天线配置要求较高,同时还存在天线安装较困难、天线之间结构件易发生形变、运输易损坏等问题^[7]。此外,为了保证航向精度,一般还会要求主从天线之间基线长度达到 1.20 m 以上,这也不利于双天线设备在小型农机上应用^[8]。同时,由于复杂地对智能农机适应性提出了更高要求,而惯性测量单元(Inertial measurement unit, IMU)等惯性传感器技术逐渐成熟,采用单天线和 IMU 融合便可实现更精简和宽适应度自动驾驶系统^[9-10]。为此,单天线 GNSS 导航系统是当前研究热点之一,稳定测量姿态中的航向角是该领域亟需解决的核心问题。

STAFFORD 等在 20 世纪 90 年代末开始研究基于单天线 GNSS 的测姿系统^[11]。RICHARD 等^[12]提出了利用单天线 GNSS 量测信噪比进行姿态测量;ZHU 等^[13]利用空速计差分得到载体运动加速度,并从加速度计输出中减去机体加速度得到重力分量从而获取姿态角;LIN 等^[14]利用 GNSS 速度差分对运动加速度进行了补偿,但差分器滞后性导致结果不实时。刘瑞华等^[15]针对高速飞行的固定翼飞机采用速度和加速度矢量获取伪航向角,用于估计无人机运动时的航向信息;宋宇等^[16]采用自适应扩展卡尔曼融合 9 轴 IMU,得到航向偏差为 2°~3°,但对转弯等航向突变时并没有很好的适应;陈光武等^[17]使用互补滤波进行航向估计,但动态追踪效果不佳。在不同速度和各种干扰下,

如何保证单天线 GNSS/IMU 导航系统航向角的稳定性是目前重点研究内容。目前,学者多在高动态运行载体上充分利用 GNSS 水平速度分量获取伪姿态角,或者是纯 IMU 进行 9 轴融合,或者是利用两位置之间的航迹角获取航向。农机作业速度 0~20 km/h,尤其是 0~1 km/h 低速作业时 GNSS 测速噪声大、磁干扰强和航向易突变,目前结构简单且成熟的航向测量方案尚未见报道^[18-19]。

针对上述单天线农机航向测量存在的问题,本文提出基于两位置法与改进强跟踪扩展卡尔曼滤波(Strong tracking extended Kalman filter, STEKF)的农机航向测量方法,对静止起步和低速作业等工况下农机 GNSS 输出的航向角与 IMU 输出的 9 轴数据融合,以实现自动驾驶农机静态初始对准,直线、转弯、高低速运行、运行中停止再启动等情况下航向角稳定测量。

1 基于两位置法与改进 STEKF 的航向测量方法

1.1 两位置法农机航向测量原理

两位置法是通过测量农机在两个不同位置点的经纬度作差,进而计算出农机在这两点之间的航向角^[20]。农机以速度 5~30 km/h 作业时,由于农机运行稳定,不频繁变换航向,且相邻采样点之间位置间隔较大有效避免了位置周跳引入的噪声,故航向可采用两位置点的经纬度进行计算^[21]。在考虑地球圆弧情况下,计算出两点之间航向角 ψ_{true} (航向角均为 $[-180^\circ, 180^\circ)$,且北偏西为正)^[22]和两个位置点之间距离 Δd ,计算式为

$$\begin{cases} \Delta d = d_2 - d_1 \\ \Delta E_{\text{lat}} = E_{\text{lat},2} - E_{\text{lat},1} \\ \Delta N_{\text{lon}} = N_{\text{lon},2} - N_{\text{lon},1} \\ d_1 = 7915.7045 \left(\frac{e}{2} \lg \frac{1 - \sin \frac{E_{\text{lat},1} \pi}{180}}{1 + \sin \frac{E_{\text{lat},1} \pi}{180}} + \lg \left(\tan \frac{\left(45 + \frac{E_{\text{lat},1}}{2}\right) \pi}{180} \right) \right) \\ d_2 = 7915.7045 \left(\frac{e}{2} \lg \frac{1 - \sin \frac{E_{\text{lat},2} \pi}{180}}{1 + \sin \frac{E_{\text{lat},2} \pi}{180}} + \lg \left(\tan \frac{\left(45 + \frac{E_{\text{lat},2}}{2}\right) \pi}{180} \right) \right) \end{cases} \quad (1)$$

$$\psi_{\text{true}} = \begin{cases} -\arctan 2(60\Delta N_{\text{lat}}, \Delta d) \frac{180}{\pi} \\ 0 & (|\Delta E_{\text{lat}}| < \varepsilon, |\Delta N_{\text{lat}}| < \varepsilon) \\ -90^\circ & (\Delta N_{\text{lat}} > 0, |\Delta N_{\text{lat}}| < \varepsilon) \\ 90^\circ & (\Delta N_{\text{lat}} < 0, |\Delta N_{\text{lat}}| < \varepsilon) \\ 0 & (\Delta N_{\text{lat}} > 0, |\Delta N_{\text{lat}}| < \varepsilon) \\ -180^\circ & (\Delta N_{\text{lat}} < 0, |\Delta N_{\text{lat}}| < \varepsilon) \\ -180^\circ & (|\psi_{\text{true}} + 180| < 0.01) \end{cases} \quad (2)$$

式中 $\Delta N_{\text{lat}}, \Delta E_{\text{lat}}$ ——经度差、纬度差
 $E_{\text{lat},s}, E_{\text{lat},e}$ ——起点、终点纬度
 $N_{\text{lat},s}, N_{\text{lat},e}$ ——起点、终点经度
 d_s, d_e ——起点、终点距离, m
 e ——WGS84 坐标系下地球偏心率, 取 0.081 82
 ε ——临界波动限制值, 取 e^{-9}

两个位置点选择决定最后航向角计算效果, 距离太远无法反映短时间内航向角变化, 距离太近则会因为卫星周跳等引入噪声误差。在测试后确定速度在 0.36 ~ 5.40 km/h 内, 以 0.10 m 为两位置点间距在行驶路径上取点计算航向。但此方法当作业速度低于 0.10 m/s 时会因为周跳噪声误差掩盖真实航向而失效, 因此, 本文引入 STEKF 航向算法。

1.2 改进 STEKF 融合航向算法

当车辆从静止启动或者低速 0 ~ 1 km/h 时, 由于多路径效应造成周跳噪声大和延迟, 在直线作业状态计算出的航向丢失了不少中间信息^[23]; 在转向状态, 距离阈值取点法由于弧线多点距离相同导致航向更新速度慢^[24]。针对上述情况, 提出基于改进 STEKF 的 IMU 9 轴融合算法, 用于低速作业时航向收敛, 其流程图如图 1 所示。

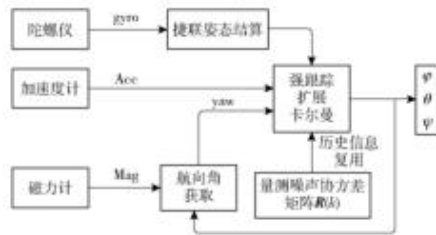


图 1 9 轴融合算法流程图
 Fig. 1 Nine-axis fusion algorithm

图 1 中 ψ 为 9 轴融合后航向角, 该算法利用 9 轴 IMU 数据通过强跟踪扩展卡尔曼算法进行融合, 通过对自适应矩阵 R 和历史信息复用约束磁力计的干扰, 算法原理为 (采用东北天导航坐标系 (n 系), 载体坐标系 (b 系) 为右前上); 设非线性系统为

$$\begin{cases} \mathbf{x}_i = f(\mathbf{x}_{i-1}) + \mathbf{F}_i \mathbf{w}_i \\ \mathbf{z}_i = h(\mathbf{x}_i) + \mathbf{v}_i \end{cases} \quad (3)$$

式中 $f(\mathbf{x}_{i-1}), \mathbf{F}_i, h(\mathbf{x}_i)$ ——非线性系统
 \mathbf{x}_i —— n 维度状态向量
 \mathbf{z}_i —— m 维量测向量
 $\mathbf{w}_i, \mathbf{v}_i$ ——系统过程噪声与观测噪声
 并且 $\mathbf{w}_i, \mathbf{v}_i$ 为互不相关的零均值高斯白噪声, 满足统计学特性

$$\begin{cases} E(\mathbf{w}_i) = 0 \\ E(\mathbf{w}_i \mathbf{w}_j^T) = \mathbf{Q}_i \delta_{ij} \\ E(\mathbf{v}_i) = 0 \\ E(\mathbf{v}_i \mathbf{v}_j^T) = \mathbf{R}_i \delta_{ij} \\ E(\mathbf{w}_i \mathbf{v}_j^T) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中 \mathbf{Q}_i ——系统过程噪声 \mathbf{w}_i 的非正定方差矩阵
 \mathbf{R}_i ——量测噪声 \mathbf{v}_i 的非正定方差矩阵
 δ_{ij} ——Kronecker- δ 函数
 $\mathbf{v}_j, \mathbf{w}_j$ ——高斯白噪声

且初始状态 \mathbf{x}_0 与 \mathbf{w}_i 和 \mathbf{v}_i 都互不相关。

状态量向量为四元数和三轴陀螺仪随机漂移共 7 维, 量测向量为三轴加速度计和磁力计算的航向共 4 维, 即

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k) = (q_0(k), q_1(k), q_2(k), q_3(k), b_m(k), b_w(k), b_w(k))^T \\ \mathbf{z}(k) = (a_{bx}(k), a_{by}(k), a_{bz}(k), \psi_n(k))^T \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\psi_n = \begin{cases} 90^\circ & (m_x = 0, m_y < 0) \\ -90^\circ & (m_x = 0, m_y > 0) \\ -\arctan \frac{m_y, 180^\circ}{m_x, \pi} & (m_x > 0) \\ 180^\circ - \arctan \frac{m_y, 180^\circ}{m_x, \pi} & (m_x < 0, m_y \leq 0) \\ -180^\circ - \arctan \frac{m_y, 180^\circ}{m_x, \pi} & (m_x \leq 0, m_y > 0) \end{cases} \quad (6)$$

式中 $q_i(k)$ ——姿态四元数, $i=0, 1, 2, 3$
 $b_w(k)$ ——陀螺仪随机漂移向量, $j=x, y, z$
 $a_{ij}(k)$ ——载体坐标系中三轴加速度测量值, $j=x, y, z$
 $\psi_n(k)$ ——将磁阻仪输出值在水平面上投影所得到的航向角
 m_x, m_y ——磁力计三轴数据

且需要先补全本地磁偏角, 取广州地区磁偏角为 -3.20° 。

转向时, 由于加速度计敏感或者磁力计干扰造成量测量噪声增大, 通过添加自适应 $R(k) =$

$\begin{bmatrix} \sigma_a^2 I_{3 \times 3} & 0 \\ 0 & \sigma_m^2 I_{3 \times 3} \end{bmatrix}$ 初步去除噪声。其中 R 中加速度

计和磁力计前置系数为

$$\begin{cases} \sigma_a^2 = c_a (1 - \|a(k)\| - \|g\|) \\ \sigma_m^2 = c_m (1 - \|m(k)\| - \|h\|) \end{cases} \quad (7)$$

式中 c_a, c_m ——权益因子

g ——重力加速度, m/s^2

$a(k)$ ——三轴加速度计测量值, m/s^2

$m(k)$ ——三轴磁力计测量值, mg

根据加速度和磁干扰强度调整状态增益矩阵, 减缓 Kalman 的预测校准。但 EKF (Extended Kalman filter) 算法由于原理缺陷无法应对快速转弯甚至原地转圈等航向突变情况。利用文献[25]开源数据集(用宝马车 + mt300 在北京取值)进行试验, 结果如图 2 所示。

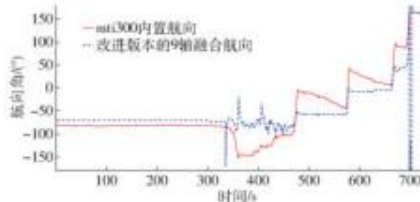


图2 EKF R 阵自适应航向测量与 mt300 航向测量比较
Fig. 2 Comparison between EKF R array adaptive heading measurement and mt300 heading measurement

由图 2 可得, 2 种算法针对航向突变(特别是农机转向时)都不能快速收敛。

为解决上述问题, 采用改进 STEKF 算法, 优化因子进行抑制。STEKF 原理为^[26]

$$\begin{cases} \hat{X}(k+1k) = F(k)\hat{X}(k|k) \\ P(k+1k) = H(k)\hat{X}(k+1k) \\ \gamma(k+1) = z(k+1) - \hat{z}(k+1k) \\ S_0(k+1) = \begin{cases} \gamma(1)\gamma^T(1) & (k=0) \\ \rho S_0(k) + \gamma(k+1)\gamma^T(k+1) & (k \geq 1) \end{cases} \\ N(k+1) = S_0(k+1) - H(k)Q(k)H^T(k) - \beta R(k+1) \\ M(k+1) = H(k)F(k)P(k|k)F^T(k)H^T(k) \\ \lambda_0 = \frac{\text{tr}[N(k+1)]}{\text{tr}[M(k+1)]} \\ \lambda(k+1) = \begin{cases} 1/\lambda_0 & (\lambda \geq 1) \\ 1 & (\lambda < 1) \end{cases} \\ P(k+1k) = \lambda(k+1)F(k)P(k|k)F^T(k) + Q(k) \\ K(k+1) = P(k+1k)H(k)[H(k)P(k+1k) \cdot \\ H^T(k) + R(k+1)]^{-1} \end{cases} \quad (8)$$

式中 $\hat{X}(k|k)$ ——第 k 个状态量估计值

$P(k+1k)$ ——第 k 个状态协方差矩阵

ρ ——遗忘因子, 取 0.965

β ——弱化因子, 取 3.500

$F(k)$ ——状态转移矩阵

$\lambda(k+1)$ ——次优渐消因子

$K(k)$ ——卡尔曼增益系数

$H(k)$ ——观测矩阵

$\gamma(k+1)$ ——残差

$R(k)$ ——量测噪声协方差矩阵

$Q(k)$ ——过程噪声方差矩阵

实际农机运行中航向突变多出现在转弯时, 为进一步限制航向漂移, 添加历史航向信息信任, 即针对量测值中的加速度计和磁力计信息在一定窗口长度内出现波动太大(对应转向太大和磁力计受到大干扰情况)时, 选择信任历史信息^[27]。

1.3 航向融合原理

两位置法和 9 轴融合算法在航向收敛上各有优缺点, 为实现各种速度梯度和工况下航向收敛, 设计了一种航向融合机制, 利用 IMU 陀螺仪 z 轴数据和 GNSS 位置点在时间阈值(取 0.50 s)内经验值的变换从而判断农机运动状态是处于静止^[28]、直线行驶、转弯行驶、高低速行驶等状态, 具体逻辑如图 3 所示。其中判断的依据为 GPS 阈值时间内移动增量/阈值时间可获取载体速度, 陀螺仪 z 轴数据较大可视为转向, 较小时可视为直线。基于此, 也可判断农机是否处于静止再启动工况, 可以辅助航向锁定功能^[29], 限制航向在一定范围, 再次启动后省去静态航向对准过程。

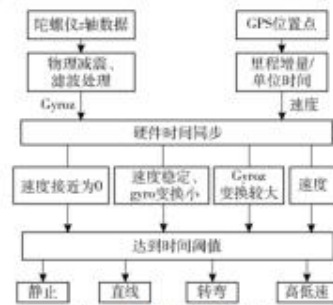


图3 农机状态判断逻辑

Fig. 3 State judgment logic of agricultural machinery

根据农机状态调整航向角 ψ_{gnss} 和 ψ_{imu} 权重, 采用一维卡尔曼滤波方式进行航向融合^[30-31]。其中, 量测量为 2 种算法计算的航向角, 状态量为实时更新的航向角, 即

$$\begin{cases} z(k) = \text{mean}(\psi_{gnss}, \psi_{imu}) \\ P(k|k-1) = P(k-1|k-1) + Q \\ K(k) = P(k-1|k-1)/P(k|k-1) + R \\ x(k|k) = x(k|k-1) + K(k)(z(k) - Hx(k|k-1)) \\ P(k|k) = (1-K)P(k|k-1) \end{cases} \quad (9)$$

式中 $z(k)$ ——量测量

2 试验与结果分析

2.1 试验设计

2.1.1 试验材料

试验平台采用雷沃 M-1204 型拖拉机,由线控底盘、卫星定位系统、导航控制系统等组成,如图 4 所示。



图 4 试验平台设备

Fig. 4 Test platform equipment

配置 melodic 版本的机器人操作系统 ROS (Robot operating system) 便携式计算机作为导航控制系统 (Ubuntu 18.04 + R7 处理器);定位模块采用 UM982 板卡,其定位精度为 2.5 mm,航向精度为 0.20°,同时在试验平台上安装双天线 GNSS 作为对照组;IMU 采用 mti300。GNSS 和 IMU 设备主要参数如表 1 所示。

表 1 GNSS 和 IMU 设备参数

Tab.1 GNSS and IMU device parameters

设备	参数	数值/型号
GNSS	板卡型号	UM982
	数据更新频率/Hz	10
	PPS 更新频率/Hz	1
	静态水平精度/mm	2.5
	动态水平精度/mm	8
IMU	型号	MTI-300-2ASG4
	翻滚角、俯仰角/(°)	0.20
	航向角/(°)	1.00
	陀螺仪零漂/(°)·h ⁻¹	10
	陀螺仪噪声密度/(°)·s ⁻¹ ·Hz ^{-1/2}	0.01
	陀螺仪 g-sensitivity/(°)·s ⁻¹ ·g ⁻¹	0.003
	加速度计零偏/μg	15
加速度随机游走/μg	60	

2.1.2 试验方法

为验证本文融合航向测量方法收敛效果,在华南农业大学农业工程楼附近进行试验,试验分 2 组进行。①静态航向获取试验:拖拉机在同一个位置做朝向不同方向旋转试验,试验其磁力计的航向效果。②动态航向试验:拖拉机在 GNSS 信号无遮挡区域行驶,包括静止、直线、转弯、高低速、运行中静止再启动等各种常见工况,以全面验证算法的有

效性。

试验时需要先对磁力计进行椭球拟合,校正软磁、硬磁干扰,获取到校正后磁力计值 $C^{(32-33)}$ 为

$$C = (D - b)A \quad (10)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} 0.537966932829808 & -0.00000000000006 & 0 \\ -0.00000000000006 & 1.001380918873126 & -0.00000000000007 \\ 0 & -0.00000000000007 & 0.649312390349438 \end{bmatrix}$$

$$b = [-0.078474254098447 \quad 0.78562238399385 \quad 0.676188244743707]$$

式中 A ——软磁干扰矩阵

b ——硬磁干扰矩阵

D ——磁力计原始数据

航向融合时,通过给定不同的 R ,使农机在不同工况下均取得较好的融合效果,表 2 为实际使用中在不同工况下 R 参考值。

表 2 农机不同状态融合时 R 参考值

Tab.2 R reference value when different states of agricultural machinery were fused

农机工况	R
静止	1.5
直线	0.3
转弯	0.6
低速/高速	0.6/0.8

2.2 磁力计静态航向获取

磁力计静态航向获取试验结果如表 3 所示,表中 GNSS 航向为 GNSS 双天线设备航向折算到以北偏西为正的航向。试验序号 2~7 为纯磁力计在不受到环境干扰时,静态初始对准可达 0.57°~2.99°,但如果附近有磁干扰,如卷闸门时航向精度明显降低(试验序号 1,8~12),偏差甚至达到 24.39°。由结果可见,磁力计具有一定的航向收敛效果,因此,单纯依靠磁力计需要辅助抗干扰设计。

表 3 纯磁力计航向初始对准

Tab.3 Initial alignment of pure magnetometer heading (°)

序号	GPS 航向角	磁力计航向角	航向角差值绝对值
1	120.75	127.36	6.61
2	150.19	153.18	2.99
3	180.64	178.31	2.33
4	149.32	147.35	1.97
5	119.75	117.70	2.05
6	89.76	88.15	1.61
7	59.93	60.50	0.57
8	29.84	24.04	5.80
9	0.76	-18.46	19.22
10	-30.98	-55.37	24.39
11	-60.09	-83.47	23.38
12	-89.64	-107.10	17.46

2.3 动态航向试验

所行驶路径和速度如图5所示,运行中GNSS航向如图6红线所示(航向以北偏西为正, $(-180^{\circ}, 180^{\circ}]$)。试验包括静止起步、直线、转弯、高低速等常见农机作业工况。以双天线GNSS航向为参照基准,对不同航向角获取算法进行比较,其中横坐标对应的是以20 Hz进行采样的GNSS数据序号。依据速度区分,即图5a前和f后为静止阶段,ab段和ef段为低速段,bc段、cd段为高速段的直线、转弯段;按照位置区分,图5b中A前和F后为静止阶段,AB段和EF段为低速段,BC段、CD段为高速段的直线、转弯段。

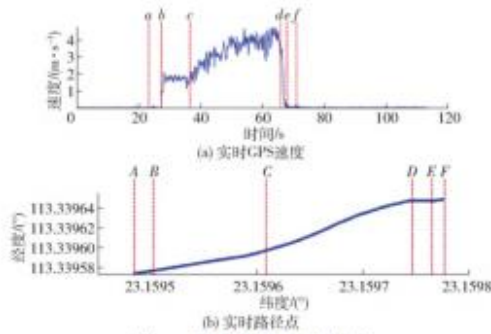


图5 行车轨迹和实时速度

Fig. 5 Driving trajectory and real-time speed

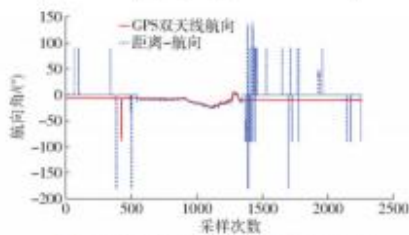


图6 以距离为阈值的航向获取方式

Fig. 6 Course acquisition method with distance as threshold

图6蓝线为以行驶距离为阈值(取0.1 m)获取到的航向数据,可见其在速度0.36~5.40 km/h内航向角获取精度较高,参考双天线航向误差均值小于 0.30° ,但在静止阶段航向明显偏离红线,最大偏差达到 10.08° 。图7蓝线部分为改进后的9轴融合算法和双天线航向数据对比,由于磁力计对于航向的收敛性,在静止时以及动态追踪过程中都较为接近双天线航向,但绝对精度上即使补充了磁偏角也与双天线GNSS数据有一定的误差。

图8蓝线为融合后航向角,相较于单一的航向算法,融合后兼具了静止状态下航向角的收敛和动态追踪过程,整个过程中与双天线GNSS航向角平均绝对误差在 0.50° 以内。

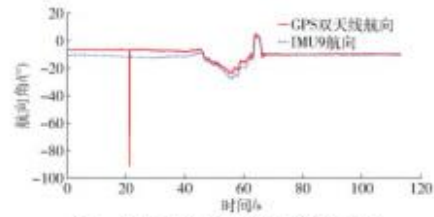


图7 9轴融合算法单独计算航向角

Fig. 7 Nine-axis fusion algorithm calculated heading separately

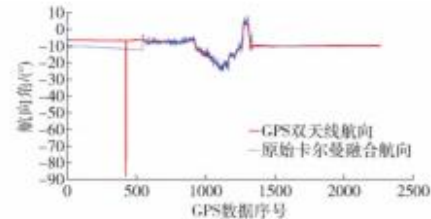


图8 航向融合后对比

Fig. 8 Course contrast after fusion

针对运行中静止到启动这种农机作业工况,如图9a中第2次速度零速段,再启动后,利用航向锁定技术,可直接复用上一时刻测量的航向角,省去静止航向对准时间(图9b,可以快速航向对准)。

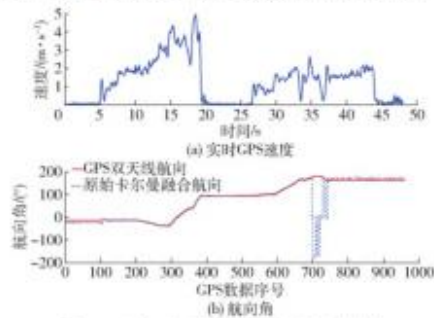


图9 运行过程中停止再启动航向融合

Fig. 9 Run through car stop and start course fusion diagram

针对静止起步瞬间、直线、转弯和高低速作业工况的航向与双天线GNSS设备的平均绝对误差,如表4所示。由表4可知,采用STKF融合航向测量方法在不同作业工况下均有较好的航向测量精度,满足农机自动驾驶控制需求。

表4 农机各阶段航向平均绝对误差

Tab. 4 Average absolute error of course of agricultural machinery at each stage

农机状态	平均绝对误差/($^{\circ}$)
静止起步瞬间	0.29
直线	0.42
转弯	0.69
高速(5~30 km/h)	0.19
低速(0~1 km/h)	0.57

3 结论

(1)提出了两位置法与改进 STEKF 融合航向测量方法,根据农机运动过程中运动速度的变化,将农机行驶分为低速(0~1 km/h)和高速(5~30 km/h)行驶两状态,分别采用改进的9轴 IMU 的 STEKF 融合算法和两位置航向获取法得到农机两状态的航向信息,并集成设计了两位置法与改进 STEKF 航向的一维卡尔曼滤波融合方法,实现了静止和宽作业速度范围的农机航向稳定获取。

(2)利用9轴融合中的加速度计和陀螺仪信息结合自适应矩阵 R 和历史信息检测,可有效抵抗磁场和转向时线加速度的突变,增加抗干扰能力。

(3)不同工况试验结果表明,两位置法与改进 STEKF 融合航向测量算法提高了单天线农机航向的稳定性,在农机常见的静止、直线行驶、曲线行驶、高低速、行驶过程中静止再启动等工况下,与双天线 GNSS 的航向角平均绝对误差在 0.50° 以内,可满足智能农机生产作业的需求。

参 考 文 献

- [1] 熊超,刘宗毅,卢传芳,等. 国外卫星导航系统发展现状与趋势[J]. 导航定位学报, 2021,9(3): 13-19.
XIONG Chao, LIU Zongyi, LU Chuanfang, et al. Development status and trend of satellite navigation system in foreign countries [J]. Journal of Navigation and Positioning, 2021,9(3): 13-19. (in Chinese)
- [2] 罗锡文,廖娟,胡炼,等. 我国智能农机的研究进展与无人农场的实践[J]. 华南农业大学学报, 2021,42(6): 8-17.
LUO Xiwen, LIAO Juan, HU Lian, et al. Research progress of intelligent agricultural machinery and practice of unmanned farm in China[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021,42(6): 8-17. (in Chinese)
- [3] 韩树丰,何勇,方慧. 农机自动驾驶及无人驾驶车辆的发展综述[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2018,44(4): 381-391.
HAN Shufeng, HE Yong, FANG Hui. A review of the development of agricultural machinery automatic navigation and driverless vehicles[J]. Journal of Zhejiang University(Agriculture and Life Sciences), 2018,44(4): 381-391. (in Chinese)
- [4] 王辉. 基于双天线 GNSS 的拖拉机自动驾驶关键技术研究及系统集成应用[D]. 广州: 华南农业大学, 2019.
WANG Hui. Research on key technology of tractor automatic navigation based on double antenna GNSS and application of system integration[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [5] 张闻宇,张国城,张智刚,等. 基于 ARMAX-KF 与速度补偿的拖拉机无前轮传感器转角估计方法[J]. 农业机械学报, 2024,55(7): 415-426.
ZHANG Wenyu, ZHANG Guocheng, ZHANG Zhigang, et al. Steering angle estimation method for tractors without angle sensor using ARMAX-KF and speed compensation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(7): 415-426. (in Chinese)
- [6] 董方园,李晓宇,王锐,等. 农机车辆的自动驾驶系统的调试方法、装置和农机车辆:CN116700293A[P]. 2023-09-05.
- [7] 何格格. GPS 单天线测姿算法研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2018.
HE Gege. Research on GPS single-antenna attitude measurement algorithm[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2018. (in Chinese)
- [8] 黄晓财,宋广鹏,高翔,等. 日本小型农机的现状与发展分析[J]. 现代农业装备, 2023,44(6): 16-23.
HUANG Xiaocai, SONG Guangpeng, GAO Xiang, et al. Analysis of the current situation and development of small farm machinery in Japan[J]. Modern Agricultural Equipments, 2023,44(6): 16-23. (in Chinese)
- [9] 马培圣,肖前贵,杨柳庆. 基于单天线 GPS 的无陀螺姿态测量系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2013,21(6): 1465-1466.
MA Peisheng, XIAO Qiangui, YANG Liuqing. Design of gyro free attitude measurement system based on single antenna GPS [J]. Computer Measurement & Control, 2013,21(6): 1465-1466. (in Chinese)
- [10] 袁洪良,杨浚宇,唐睿,等. 基于低成本惯导和运动约束的农机高精度定位系统研究[J]. 农业机械学报, 2023,54(7): 17-25.
YUAN Hongliang, YANG Junyu, TANG Rui, et al. High-precision localization of autonomous agricultural machinery using low-cost IMU and motion constraints[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(7): 17-25. (in Chinese)
- [11] JOHN V. Implementing precision agriculture in the 21st century[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2000, 76(3): 267-275.
- [12] RICHARD P, KEITH A, JOHN D, et al. Applications of global positioning system velocity-based attitude information[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2001,24(5): 998-1008.
- [13] ZHU R, SUN D, ZHOU Z, et al. A linear fusion algorithm for attitude determination using low cost MEMS-based sensors[J]. Measurement, 2007,40(3): 322-328.
- [14] LIN Xiaobo, YU Yao, SUN Changyin. Real-time attitude and gyro-bias estimation for small UAVs using low-cost sensors[C]//2016 12th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA), 2016.

- [15] 刘瑞华,张鹏,张磊. 基于单天线GPS的伪姿态测量算法研究[J]. 中国民航大学学报, 2009,27(6): 25-28.
LIU Ruihua, ZHANG Peng, ZHANG Lei. Research on pseudo-attitude measurement algorithm based on single antenna GPS [J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2009,27(6): 25-28. (in Chinese)
- [16] 宋宇,翁新武,郭昕刚. 基于四元数EKF算法的小型无人机姿态估计[J]. 吉林大学学报(理学版), 2015,53(3): 511-518.
SONG Yu, WENG Xinwu, GUO Xin'gang. Attitude estimation of small UAV based on quaternion EKF algorithm[J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2015,53(3): 511-518. (in Chinese)
- [17] 陈光武,李少远,李文元,等. 基于递推最小二乘与互补滤波的姿态估计[J]. 控制理论与应用, 2019,36(7): 1096-1103.
CHEN Guangwu, LI Shaoyuan, LI Wenyuan, et al. Attitude estimation based on recursive least squares and complementary filtering[J]. Control Theory & Applications, 2019,36(7): 1096-1103. (in Chinese)
- [18] 张智刚,朱启明,何杰,等. 基于RTK-GNSS和MEMS陀螺仪的车辆航向角测量技术[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(5): 34-37.
ZHANG Zhigang, ZHU Qiming, HE Jie, et al. Vehicle heading angle measurement technology based on RTK-GNSS and MEMS gyroscope[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019,40(5): 34-37. (in Chinese)
- [19] 何杰,高维炜,王辉,等. 基于GNSS航向微分和MEMS陀螺仪的农机轮角测量方法[J]. 华南农业大学学报, 2020, 41(5): 91-98.
HE Jie, GAO Weiwei, WANG Hui, et al. Agricultural wheel angle measurement method based on GNSS course differentiation and MEMS gyroscope[J]. Journal of South China Agricultural University, 2020,41(5): 91-98. (in Chinese)
- [20] 徐洪群,何文东,刘斌,等. CGCS2000大地问题解算工程运用研究[J]. 火力与指挥控制, 2016(10): 168-173.
XU Hongqun, HE Wendong, LIU Bin, et al. Research on application of CGCS2000 geodetic problem solving engineering[J]. Fire Control & Command Control, 2016(10): 168-173. (in Chinese)
- [21] 许志,史伟,唐硕. 一种带航迹角约束的临近空间目标拦截中制导算法[J]. 宇航学报, 2020, 41(9): 1175-1183.
XU Zhi, SHI Wei, TANG Shuo. Amidcourse guidance algorithm with track angle constraint for near space target interception [J]. Journal of Astronautics, 2020, 41(9): 1175-1183. (in Chinese)
- [22] 周祖洋,庄广琛,郭玉胜,等. 一种载体航迹角计算方法及系统;CN116858238A[P]. 2023-10-10.
- [23] 李正帅,缪玲娟,周志强,等. GNSS/SINS组合导航中多路径效应的识别与抑制算法[J]. 导航定位与授时, 2022, 9(4): 85-92.
LI Zhengshuai, MIAO Lingjuan, ZHOU Zhiqiang, et al. Multi-path effect recognition and suppression algorithm in GNSS/SINS integrated navigation[J]. Navigation Positioning and Timing, 2022,9(4): 85-92. (in Chinese)
- [24] 陆婵. GPS软件仿真系统的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2015.
LU Chan. Research on GPS software simulation system[D]. Nanning: Guangxi University, 2015. (in Chinese)
- [25] 赵彦明,秦水元,严恭敏. 自主式微航姿系统信息融合方法比较[J]. 仪表技术与传感器, 2020(10): 122-126.
ZHAO Yanming, QIN Yongyuan, YAN Gongmin. Comparison of information fusion methods for autonomous micro-attitude systems[J]. Instrument Technique and Sensor, 2020(10): 122-126. (in Chinese)
- [26] 叶斌,徐航. 强跟踪滤波器与卡尔曼滤波器对目标跟踪的比较[J]. 空军雷达学院学报, 2002(2): 17-19.
YE Bin, XU Yu. Comparison of strong tracking filter and Kalman filter for target tracking[J]. Journal of Air Force Radar Academy, 2002(2): 17-19. (in Chinese)
- [27] 吴建华,杜威,王辰,等. 北极东北航道商船陀螺罗经航向误差修正算法[J]. 交通信息与安全, 2021,39(6): 73-81.
WU Jianhua, DU Wei, WANG Chen, et al. Course error correction algorithm of gyro compass for merchant ship in Arctic Northeast Passage[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2021,39(6): 73-81. (in Chinese)
- [28] 张全,牛小贇,付立鼎. 一种静止状态的判断方法及装置;CN108120450B[P]. 2018-06-05.
- [29] 吴飞,朱龙泉,陈向东,等. 一种约束惯性/卫星组合导航静止时航向漂移的方法;CN112729281A[P]. 2021-04-30.
- [30] 黄小平,王岩. 卡尔曼滤波原理及应用MATLAB仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- [31] WANG P, HU L, HE J, et al. Method for measuring the steering wheel angle of paddy field agricultural machinery by integrating RTK-GNSS and dual-MEMS gyroscope[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2022, 15(6): 197-205.
- [32] 陈洋豪,徐祥,李凤,等. 基于RLM的MEMS三轴磁力计标定方法[J]. 传感技术学报, 2023,36(10): 1569-1575.
CHEN Yanghao, XU Xiang, LI Feng, et al. Calibration method of MEMS three-axis magnetometer based on RLM[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2023,36(10): 1569-1575. (in Chinese)
- [33] 沈跃,孙志伟,沈亚运,等. 直线型植保无人机航姿UKF两级估计算法[J]. 农业机械学报, 2022,53(9): 151-159.
SHEN Yue, SUN Zhiwei, SHEN Yayun, et al. UKF two-stage estimation algorithm for heading and attitude of linear plant protection UAV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(9): 151-159. (in Chinese)

《农业机械学报》第十届编辑委员会 (按姓氏笔画为序)

荣誉主任委员: 汪想华 冯钢元 诸慎友
主任委员: 罗锡文
主 编: 任露泉
执行主编: 苑严伟
副主任委员: 任发政 闫楚良 杜太生 李天来 吴普特 应义斌
 陈 志 陈学庚 赵春江 郝文聚 袁寿其 康绍忠
副 主 编: 于海业 方宪法 李 红 赵凤敏 韩鲁佳
顾问编委: 丁为民 马 旭 王相友 毛罕平 毛恩荣 冯仲科 权 龙 刘荣厚 刘瑞雯 江连洲
 李岸萍 杨学军 何东健 张全国 陈巧敏 陈海涛 尚书旗 周志立 贾洪雷 姬长英
编 委: 丁幼春 王 俊 王巧华 王东伟 王 伟 王金九 王庆杰 王金武 王金星 王金峰
 王德成 毛文华 付 君 付 强 朱 艳 朱立学 朱孝勇 朱德泉 任建强 刘 东
 刘木华 刘立晶 刘成良 刘建德 刘燕妮 汤方平 许章羽 坎 杂 李久生
 李云开 李民赞 李志合 李保国 李洪文 李景彬 李道亮 杨 刚 杨万能 杨信廷
 杨然兵 杨福涛 何 进 何 勇 邹小波 汪小岳 汪若生 沈明霞 宋正河 宋怀波
 张 永 张 超 张 漫 张兆国 张若宇 张领先 张德胜 陆明洲 陆海燕 陈立平
 陈建德 陈黎卿 武传宇 苑 进 尚松浩 易维明 金诚谦 周 俊 周海燕 庞树杰
 屈忠义 孟志军 赵立欣 赵武云 赵茂程 赵洪东 郝建军 胡 炼 胡志超 胡建军
 胡英涛 俞高红 徐立友 徐立章 徐俊涛 郭俊先 甄江涛 黄玉祥 黄东岩 曹成茂
 曹光乔 崔清亮 蒋雪松 韩 英 韩文莹 韩志武 戴 英 廖庆喜 薛金林 薛新宇
外籍编委: Abdul M Mounazeu Ce Yang Chao Chen Chung Sun Ok Ghulam Hussain Guoming Li
 Hak-Jin Kim Jianfeng Zhou Kang Kang Liangliang Yang Long He Manoj Karkee
 Naiqian Zhang Nick Sigrimis Ning Wang Noboru Noguchi Sergio Castro-Garcia
 Siva K Balasubram Stavros G Vongiotkas Wei Gao Wenqiao Yuan Xin Sun
 Yubin Lan Yuzhen Lu Zhiming Qi Zhiwei Zeng Zhou Zhang
青年编委: 王立军 王纪章 冯权茂 权龙哲 刘孟德 刘继龙 孙 红 杜小强 李仙岳 李江波
(第一届) 李继宇 李 斌 李 臻 杨 晓 肖茂华 关 敏 谷晓博 张开兴 张宏鸣 张青松
 张喜瑞 张慧春 金 鑫 赵 超 赵 博 郭建斌 秦 宽 唐 汉 黄小毛 彭才望
 彭 飞 傅隆生 董俊华 栢庆辉 廖宜涛 翟长远 甄俊涛 樊信春 雷丽丽 戴 飞
编辑部主任: 陆海燕 **编辑部副主任:** 韩 英 庞树杰 **编辑:** 唐金秋 陈 亮 杨子怡

农 业 机 械 学 报
NONGYE JIXIE XUEBAO

2024 年 第 55 卷 第 12 期 卷终
 (月刊, 1957 年创刊)
 2024 年 12 月 25 日出版

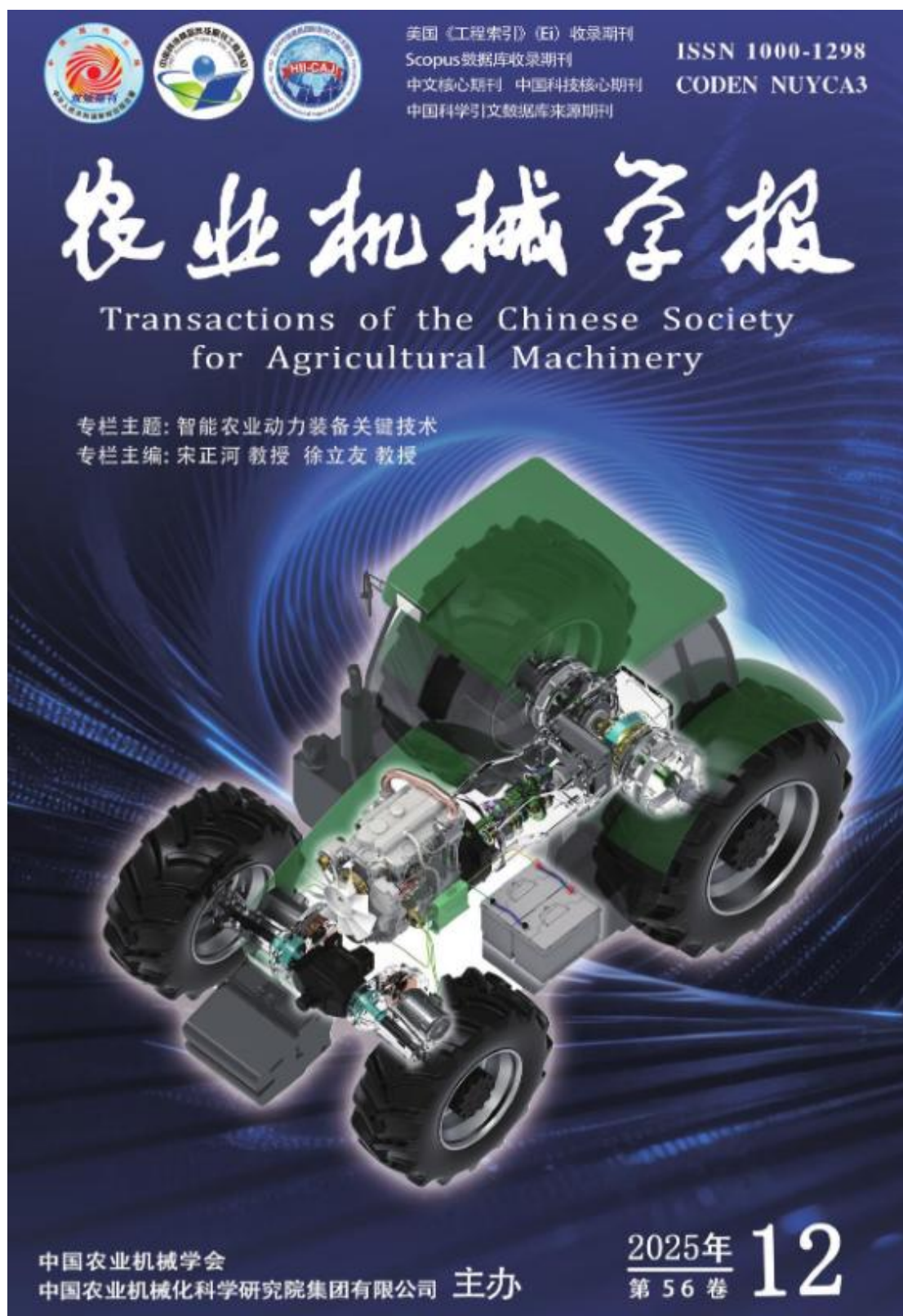
Transactions of the Chinese Society
 for Agricultural Machinery
 No. 12 Vol. 55 2024
 (Monthly, started in 1957)
 Published on 25, December 2024

主 管 中国科学技术协会
主 办 中国农业机械学会
 中国农业机械化科学研究院集团有限公司
编辑出版 《农业机械学报》编辑部
 (地址: 北京德外北沙滩 1 号 6 信箱)
 邮政编码 100083
主 编 任露泉
印 刷 北京富泰印刷有限责任公司
国内发行 中国邮政集团公司北京报刊发行局
订 购 处 全国各地邮局
国外发行 中国国际图书贸易集团有限公司
 (北京 399 信箱)

Responsible Department:
 China Association for Science and Technology
Sponsored by: Chinese Society for Agricultural Machinery
 Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd.
Published by: Editorial Office of Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery
Editor in Chief: Ren Luquan
Editorial Office: No. 1 Beishatan, Deshengmen Wai, Beijing 100083, China
Tel: 86-10-64882610/64882231
Fax: 86-10-64867367
http: //www.j-csams.org
E-mail: njcb@caams.org.cn
Overseas Distributor: China International Book Trading Corporation
 (P.O. Box 399, Beijing, China)

ISSN 1000-1298 国内邮发代号 2-363 国外发行代号 M289 国内定价 100.00 元
 CN 11-1964/S

3.2. 融合改进 YOLOv5s 与毫米波雷达的避障目标检测方法



基于无人机多源遥感与气象参数的大田玉米地上生物量估算研究	邵国敏	韩文霞	周倩倩	王 毅	苗广花(436)
基于机器视觉与高光谱成像的西瓜考种系统研究	赵泽华	王庆艳	陈俊杰	黄文倩(450)	
基于近红外光谱特征信号的秸秆粒径校正方法研究	朱礼强	郭建涛	杨增玲	刘 贤	韩鲁佳(460)
基于近红外透射光谱与卷积神经网络的蜜柚枯水病无损检测方法	陈俊杰	朱文杰	赵泽华	李佳琪	王庆艳 黄文倩(470)
基于改进 YOLO v8s-OB 的黄瓜霜霉病菌分生孢子梗与孢子囊定量检测	张一丁	乔 琛	张领先	韩宗桓(479)	
基于轻量化多模态 Blend-CNN 模型的小麦病虫害识别方法	郝 霞	闫子钰	宋 扬	李广烨	王志军 郭旭超(490)
基于优化靶向诱捕器的 YOLO v8 活体稻纵卷叶螟智能识别方法	刘双志	王刘西航	王金星	胡寒亮	杨圣杰 马 盼(499)
基于 Gland-MSConvNet 模型的棉花叶片色素腺体分割与表型量化分析	邵利敏	耿玉红	徐雅轩	王国宁	闫 庚 张 怡(510)
基于 PG-YOLO v8s 的黄瓜白粉病菌显微图像精准检测	张一丁	韩宗桓	乔 琛	张领先(522)	
基于 FCML-YOLO v8 的杏鲍菇表型提取与分级方法	谢立敏	吴昊宇	景 均	叶大鹏	方 兵(534)
基于多源异构数据和知识图谱的作物病害关联分析	王 波	丁俊琦	吴奇峰	张领先(546)	
融合多尺度特征与多列卷积网络的水稻病无人机遥感计数方法	潘 义	苏浩然	袁琳琳	吴 刚	石 春 王宜坤 华 胜(560)
基于 YOLO-IGC 的油茶果计数及空间定位分布	伍鹤林	刘茂豪	袁可娟	李功磊	蒋 杰 王荣炎(568)
基于 DAM-ResNet 的广视野下牛舍奶牛个体识别方法	司永胜	谷文利	王京俊	马亚嵩	袁 明 王 斌 王振存(581)
基于改进 YOLO v8 关键点检测的西门塔尔牛个体识别方法	田振江	韩 威	张 超	李月荣	于福东 钟馨晨(591)
基于局部感知的肉牛多行为检测与统计方法	王 芳	刘星宇	任力生	付辰伏	贾惠旭(603)
基于多尺度融合网络的轻量化牛脸识别算法	齐欣生	全家乐	秦浩天	刘利强	刘慧文(615)
基于变分模态分解联合小波分析的颗粒物流量微波信号测量研究	杨立伟	张四程	曹泽华	贾子杨	彭永贵 朱海飞(623)
融合改进 YOLO v5s 与毫米波雷达的障碍物检测算法	胡 栋	梁楚奇	罗雅玲	柳绍迪	阮庆强 汪 涛 黄培奎 王 培 孙宜田(634)
基于改进 YOLO v5s 与毫米波雷达的障碍物检测算法	汪 涛	罗佳龙	董佳生	王佳涛	罗 皓 宁佛泰 胡 栋 何 杰(645)
基于 MLKA 与时序 RANSAC 融合的梨园导航线提取方法	周建军	刘泉乐	曹 磊	樊 林	邱 权(657)

doi: 10.6041/j.issn.1000-4298.2025.12.058

融合改进 YOLO v5s 与毫米波雷达的避障目标检测方法

胡炼^{1,2} 梁楚奇¹ 罗雅玲¹ 柳诏迪¹ 阮庆强¹ 汪沛^{1,2} 黄培奎^{1,2}
王培³ 孙宜田⁴

(1. 华南农业大学工程学院, 广州 510642; 2. 农业装备技术全国重点实验室, 北京 100083;

3. 北京市农林科学院智能装备技术研究中心, 北京 100087; 4. 山东省农业机械科学研究院, 济南 250100)

摘要: 为提高农场环境下无人驾驶农机对农田障碍物感知的准确性, 针对视觉检测容易受光照和毫米波雷达检测易受车辆颠簸等, 以及视觉检测目标算法在复杂田间下参数量大、计算量大、模型体积大的问题, 本文提出一种融合视觉与毫米波雷达信息的无人驾驶农机避障目标检测方法。首先过滤毫米波雷达的部分目标数据, 并提出基于自适应扩展卡尔曼滤波的目标追踪算法。然后制作农场环境障碍物数据集, 构建基于改进 YOLO v5s 的目标检测模型。随后, 通过时间戳对齐和直接线性标定法的坐标变换, 实现雷达点向图像像素坐标系的映射。最后, 通过决策级融合方法和目标匹配策略构建毫米波雷达与视觉传感器的障碍物检测信息融合模型。试验结果表明, 改进 YOLO v5s 模型平均精度均值为 97.0%, 与原模型相近, 但参数量、计算量、模型内存占用量仅分别为原 YOLO v5s 模型的 40.2%、39.2% 和 38.2%, 与 YOLO v4-Tiny、YOLO v7-Tiny、YOLO v4 和 YOLO v7 模型相比能够更好地平衡精确率与检测速度。多场景试验结果表明, 本文提出的融合方法在白天试验时相较于雷达与视觉识别准确率分别提高 2.67、15.07 个百分点, 夜间试验时融合检测方法能有效弥补视觉失效的情况, 比单传感器算法具有更好的鲁棒性与准确性, 同时基于融合检测方法有效实现了无人驾驶农机停车避障。

关键词: YOLO v5s; 农田障碍物检测; 毫米波雷达; 视觉目标检测; 信息融合**中图分类号:** S220; S24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4298(2025)12-0634-11**OSID:**

Improved Obstacle Avoidance Target Detection with YOLO v5s and Millimeter Wave Radar Fusion

HU Lian^{1,2} LIANG Chuqi¹ LUO Yaling¹ LIU Zhaoqi¹ RUAN Qingqiang¹ WANG Pei^{1,2} HUANG Peikui^{1,2}
WANG Pei³ SUN Yitian⁴

(1. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2. State Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing 100083, China

3. Intelligent Equipment Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100087, China

4. Shandong Academy of Agricultural Machinery Sciences, Ji'nan 250100, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of unmanned agricultural machine's perception of obstacles in the farm environment, to solve the problem that visual detection is easily affected by light and millimeter-wave radar detection is easily affected by vehicle bumps, etc., as well as the problem that the visual target detection algorithm has a large number of parameters, a large amount of computation, and a large volume of the model under the complex field, this paper proposes an obstacle-avoidance target detection method for unmanned agricultural machines with the fusion of visual and millimeter-wave radar information. Part of the radar target data from millimeter-wave radar is first filtered, and a target tracking algorithm based on adaptive extended Kalman filtering is proposed. Then a farm environment obstacle dataset is produced and a target detection network based on improved YOLO v5s is constructed. Subsequently, the mapping of radar points into the image pixel coordinate system is realized by time-

收稿日期: 2025-03-12 修回日期: 2025-04-22

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2022SFG00202)、广州市基础与应用基础研究专题青年博士“启航”项目(SL2023A04J00077)和湖南省科技厅重大项目(2023NK1020)**作者简介:** 胡炼(1984—),男,研究员,博士,主要从事智能农机装备和无人农场技术研究,E-mail: lianh@scau.edu.cn**通信作者:** 黄培奎(1990—),男,高级工程师,博士,主要从事多源信息融合定位与感知技术研究,E-mail: pkhuang@scau.edu.cn

stamp alignment and coordinate transformation with direct linear calibration method. Finally, the fusion model of obstacle detection information from millimeter-wave radar and visual sensors is constructed through the decision-level fusion method and target matching strategy, and the experimental results show that the mean average accuracy of the improved YOLO v5s is 97.0%, which is similar to that of the original model, but the number of parameters, the amount of computation, and the size of the model are only 40.2%, 39.2%, and 38.2% of the original YOLO v5s model, respectively. Compared with YOLO v4 - Tiny, YOLO v7 - Tiny, YOLO v4 and YOLO v7 models, it can better balance the detection accuracy and speed. The results of multi-scene tests show that the fusion method proposed in this paper improves the recognition accuracy by 2.67 percentage points and 15.07 percentage points compared with radar and camera in daytime tests, and the fusion detection method can effectively make up for the failure of the camera in nighttime tests, and has better robustness and accuracy than the single-sensor algorithm, and the fusion obstacle avoidance system effectively realizes the parking avoidance of the unmanned agricultural machine.

Key words: YOLO v5s; farmland obstacle detection; millimeter wave radar; visual object detection information fusion

0 引言

随着全球人口的不断增加和农业生产需求的提升,传统农业模式已经难以满足高效和可持续发展的要求。智慧农业和无人智慧化农场成为农业现代化的一个重要方向^[1]。在智慧农业的整体框架中,无人化智慧农场的建设尤为关键,是实现农业自动化、信息化和精准化的核心组成部分,而无人化智慧农场的核心技术之一便是农机无人驾驶技术。无人驾驶农机的发展可以为现代农业带来更多的效率优化^[2]。真实的农田环境是复杂的非结构化环境,农机从出库到田间作业过程中不可避免地遇到障碍物,利用障碍物信息检测技术及时准确地感知障碍物,是保证智能农机在复杂农田环境中的作业安全的关键细节之一^[3-5]。

在障碍物检测领域,传感器的选择至关重要。单一类型传感器的目标识别都存在一定的缺点,导致其目标检测的可靠性低。视觉传感器应用广泛但易受环境影响^[6]。毫米波雷达具有高穿透性,能在雨、雾、灰尘等恶劣环境中正常工作,受光照影响小,可全天时运行;其天线尺寸小,能实现高精度的距离和速度测量,且可同时监测多个目标^[7],能对农田环境多种目标检测。但同时毫米波雷达无法识别目标的类别,且检测数据中存在大量无效目标^[8]。因此,单一类型传感器感知环境的方式逐渐被多传感器融合感知环境方式替代。

目前常用的视觉检测障碍物方法分为传统视觉算法和深度学习算法^[9-10],传统的目标检测算法多依赖于目标的颜色和轮廓特征,受光照条件、物体比例变化和部分遮挡等环境因素影响,检测的准确率不高^[11]。刘慧等^[12]使用轻量化网络 MobileNetV2 作为 SSD 模型中的骨干网络,并以反向残差结构结

合空洞卷积改进了模型,改进后的模型能有效地检测田间行人。陈斌等^[13]基于 YOLO v3 - tiny 框架,通过增加第三预测层提升小目标检测效果,并在主干网络中加入残差模块,以增加网络深度和学习能力,提高模型检测性能。蔡舒平等^[14]通过在 YOLO v4 模型主干网络中引入逆残差单元 (Inverted residual unit),替换原有的残差模块,从而提高模型检测精度。杨吴霖等^[15]提出一种改进 YOLO v5 模型,通过引入注意力机制 CBAM、增加检测头和使用 Ghost 卷积替代传统卷积等操作,降低模型复杂度提高模型精度。张炳力等^[16]提出使用目标检测框交并比和 NNDA 关联算法实现毫米波雷达和相机的数据融合,最后基于扩展卡尔曼滤波算法进行目标跟踪提高车辆目标的检测精度。WANG 等^[17]采用视觉算法 YOLO 与雷达检测数据进行决策级融合,根据雷达生成框和视觉检测框的交并比关联雷达和相机检测的车辆目标,减少了车辆检测的误差。赵望宇等^[18]提出了一种改进的城市复杂环境下智能车前方车辆感知方法,结合雷达和视觉数据,并增加目标跟踪过程以提高检测准确性。甘耀东等^[19]把毫米波雷达数据跟踪的自适应扩展卡尔曼滤波算法与改进的 SSD 模型结合,有效地提高了车辆目标识别精度。李勇滔等^[20]基于遗忘因子的自适应拓展卡尔曼滤波算法对目标进行追踪,结果表明该方法具有更好的可靠性和鲁棒性。

基于视觉目标检测大多选用实时性较高的 YOLO 算法系列,但单一视觉传感器极易受环境影响。多传感器方面关于毫米波雷达和视觉避障的研究主要是城市道路情况,大多聚焦在结构化道路上的行人和车辆的检测上,并且针对毫米波雷达与视觉的信息融合策略,通常以毫米波雷达数据生成感兴趣区域 (ROI) 与视觉检测框进行交并比检测,并

未考虑在复杂场景中毫米波雷达可能存在的漏检状况以及毫米波雷达 ROI 提取方法无法涵盖所有目标。基于此,本文提出基于改进 YOLO v5s 与毫米波雷达融合的农田环境下障碍物检测算法。通过对 YOLO v5s 改进使模型在各项性能不降低的情况下,实现检测模型的轻量化。对毫米波雷达数据进行预处理剔除干扰目标,提出一种自适应卡尔曼滤波算法提高目标追踪精度。将雷达目标与视觉检测进行决策级融合,同时对传感器丢失的信息进行互补后输出障碍物大小、距离、类别信息。

1 改进 YOLO v5 模型

YOLO v5 是 YOLO 系列经典版本,较 YOLO v8 结构更简洁、存储空间需求小,便于后期向嵌入式设备部署^[21-22]。针对农机作业过程中的障碍物检测,目标检测网络不仅需要较高的识别精度,还需要较小的模型宽度和深度以减少对运算资源的占用,现有的 YOLO v5s 算法的参数数量和计算量相对于嵌入式平台偏大,基于此,针对 YOLO v5s 进行以下改进。①使用轻量化网络 GhostNetV2 替换主干网络的 C3 模块,以实现模型的轻量化设计,大幅降低参数数量和计算量,提升检测速度。②使用 VOVGSCSPC 结构和 AKConv 模块构建 AVCStem 结构以精简特征融合网络结构。③采用 BIFPN 加权双向特征金字塔网络将多尺度特征进行融合,以增强模型的特征提取能力。改进 YOLO v5s 结构如图 1 所示。

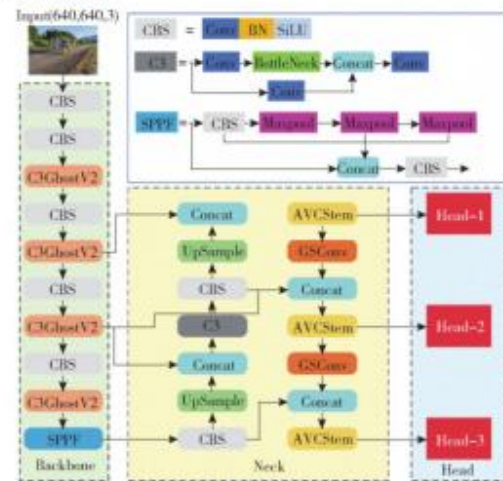


图 1 改进 YOLO v5s 结构
Fig. 1 Improved YOLO v5s structure

1.1 GhostNetV2 特征提取网络

传统 YOLO v5 模型中,骨干网络 (Backbone) 采用的是较为复杂的 C3 网络结构,会输出众多的特

征图,这些特征图存在许多相似的输出特征,冗余的特征图会导致网络参数多、运算量大和网络训练慢等问题。选取 GhostNet^[23] 系列中最新的 GhostNetV2 轻量级模型作为主干特征提取网络,解决精度和速度 2 个关键问题。

GhostNetV2 在第 1 代 GhostNet 的基础上,进一步引入 DFC Attention 机制,加强网络捕捉长距离的空间信息。GhostNetV2 依旧采用 Inverted bottleneck 的设计,由 2 个 Ghost 模块和 1 个 DFC 模块^[24] 构成。使用 GhostNetV2 的 Bottleneck 结构如图 2 所示。

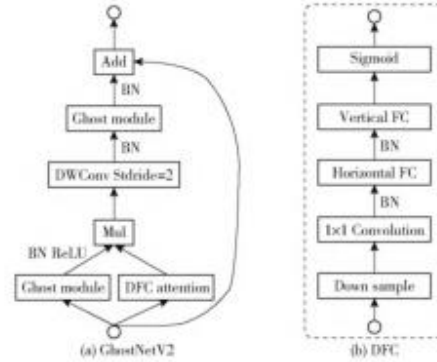


图 2 GhostV2 Bottleneck 结构
Fig. 2 GhostV2 Bottleneck structure

C3 模块与 GhostV2 Bottleneck 结合,得到 C3GhostNetV2 模块(图 3),在不改变主干下采样基础上,为降低模型复杂度,基于 GhostNetV2 的 C3GhostV2 模块改进模型主干网络 Backbone,可降低模型参数数量与计算量。

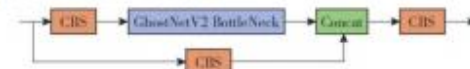


图 3 C3GhostV2 模块
Fig. 3 C3GhostV2 module

1.2 AVCStem 结构

1.2.1 GSCConv 模块

GSCConv^[25] 模块基本结构如图 4 所示,GSCConv 模块融合 GhostNet 和 ShuffleNetV2 的轻量化设计思想,输入特征图首先经由标准卷积层进行下采样处理,以初步提取并降维特征,并引入深度可分离卷积操作。相对于标准卷积,最后在通道维度上执行 2 种卷积后特征图的精细拼接,并通过引入 Shuffle 操

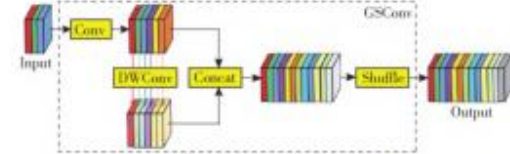


图 4 GSCConv 模块结构
Fig. 4 GSCConv module structure

作,巧妙地实现标准卷积所蕴含丰富信息与深度可分离卷积输出之间的深度融合。GSConv 模块参数更少,同时 GSConv 模块可以更好地平衡模型的准确性和速度,更适用于构建轻量级检测模型。因此采用 GSConv 模块代替 YOLO v5s 颈部网络中部分 Conv 模块,以降低网络计算复杂性。

1.2.2 AKConv 模块

AKConv^[26] 模块的结构如图 5 所示,其中 C 代

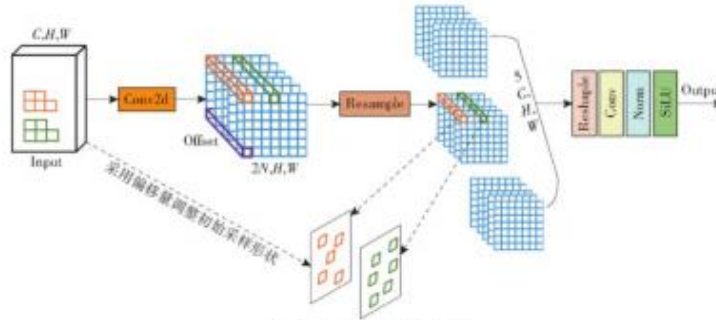


图 5 AKConv 模块结构

Fig. 5 AKConv module structure

1.2.3 AVCStem 模块

VOVGSCSP 模块包括 GSBottleneck 模块,如图 6 所示,而 GSBottleneck 模块又基于 GSConv 基础模块。GSConv 以较低的时间复杂度最大限度地保留了通道间的联系,通过这种设计,VOVGSCSP 模块可有效降低计算和网络结构的复杂性,同时保持足够的精度。

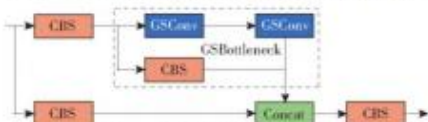


图 6 VOVGSCSP 模块结构

Fig. 6 VOVGSCSP module structure

引入 VOVGSCSP 和 AKConv 模块构建全新的 AVCStem(AKConv - VOVGSCSP - Stem) 模块,以替换颈部网络中的 Concat 位置之后的 C3 模块,AVCStem 结构如图 7 所示。这种替换可以使深度可分离卷积接近普通卷积的性能,提高模型捕获上下文信息的能力,这在一定程度上可减少参数计算量,提高模型在目标特征图上的计算速度。

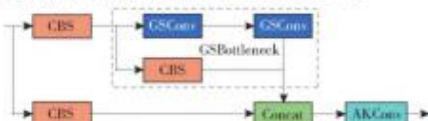


图 7 AVCStem 模块结构

Fig. 7 Structure of AVCStem module

1.3 BIFPN 双向特征金字塔

YOLO v5 中的 PANet^[27] 结构(图 8a)主要增强

表通道数(Channel); H 代表特征图高度(Height), W 代表特征图宽度(Width)。传统卷积运算的卷积核和步长是固定的,而 AKConv 卷积赋予卷积核任意数量的参数和任意采样形状,并且 AKConv 允许卷积参数的数量线性上升或下降,其能够根据不同的目标灵活调整卷积核的大小和形状。该自适应调整机制能够提高模型在处理复杂目标时的灵活性和准确性。

位置信息,但在不同分辨率图像输入进行融合时,只采用简单的相加操作,这种方式在特征融合过程中容易丢失原始特征信息,从而可能导致训练过程中的偏差,影响模型的学习效果。因此,采用借鉴加权双向特征金字塔网络的结构 BIFPN^[28],如图 8b 所示,BIFPN 去除了单输入节点从而减少了模型的参数。此外,加权双向特征金字塔网络对同一级别的输入节点和输出节点增加一条额外边缘,所以引入学习权重对不同输入特征的重要性进行定义,在不增加成本的情况下融合更多特征。加权双向特征金字塔网络 BIFPN 实现了自上而下和自下而上深浅层的特征双向融合。优化 YOLO v5s 模型的 Neck 结构如图 8b 所示。

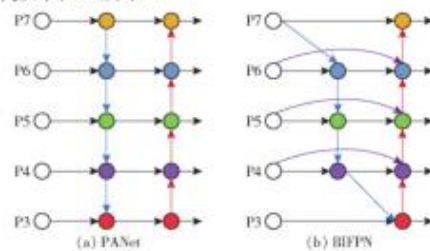


图 8 PANet 和 BIFPN 结构

Fig. 8 Structure of PANet and BIFPN

2 基于毫米波雷达追踪前方目标

2.1 毫米波雷达数据预处理

选用某公司的 SR73F 短距毫米波雷达每帧至

多包含 64 个目标物信息,由于雷达工作原理,农田道路不平以及农机自身造成的车身抖动等原因,毫米波雷达每帧返回的数据中包含大量无效信息,对无人驾驶农机的目标检测造成了干扰。因此,为了给目标跟踪算法提供可靠、稳定的目标数据以及较少计算量的数据,需要对毫米波雷达数据进行筛选。

(1) 根据雷达技术参数表可知雷达检测距离 y 、速度 v 和角度 θ 范围分别为

$$\begin{cases} 0.2 \text{ m} \leq y \leq 40 \text{ m} \\ -18 \text{ m/s} \leq v \leq 18 \text{ m/s} \\ -60^\circ \leq \theta \leq 60^\circ \end{cases} \quad (1)$$

若毫米波雷达解析出的目标信息超出雷达参数范围,该类目标识别度不高且安全隐患低,则将此目标作为无效目标剔除。

(2) 设无人驾驶农机幅宽为 M ,考虑作业速度一般较低和雷达检测距离范围,因此将横向距离 x 和纵向距离 y 过大的目标通过设定阈值过滤,过滤公式为

$$\begin{cases} -aM \leq x \leq aM \\ y \leq b \end{cases} \quad (2)$$

式中 a ——无人驾驶农机横向过滤阈值的系数
 b ——无人驾驶农机纵向过滤阈值的系数

(3) 农机在田间行驶过程中,由于车辆抖动导致毫米波雷达返回多个重复目标数据,选用 DBSCAN 聚类算法处理毫米波雷达返回的重复数据,提取每个簇的中心点速度和位置数据,以此作为有效的目标信息,从而实现重复目标的剔除。

2.2 自适应扩展卡尔曼滤波跟踪

毫米波雷达检测前方目标以获取位置等数据,经处理自动形成航迹并预测目标下一时刻位置。但获取目标距离、速度信息时,因测量误差和过程噪声,数据会不准确,所以需采用滤波算法降低测量与实际值的误差。扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filter, EKF)是卡尔曼滤波在非线性系统中的一种扩展,由于无人驾驶农机和行人等目标物的非线性运动,可采用 EKF 将非线性滤波问题转化为线性滤波问题^[29]。常规扩展卡尔曼算法中的状态噪声 Q_{k-1} 和观测噪声 R_k 为固定不变的经验值,并且假设噪声特性的参数在滤波整个流程中,关键参数维持恒定状态。然而,扩展卡尔曼滤波器在面对噪声统计特性未知及外部环境动态变化等不确定性因素时,可能会遭遇滤波精度下滑乃至发散的风险,进而对状态估计的准确性产生不利影响。为克服这一局限,采用自适应扩展卡尔曼滤波(AEKF)算法。

目标跟踪系统状态向量和量测向量空间模型可以表示为

$$\begin{aligned} X_k &= f(X_{k-1}) + V_{k-1} \\ Z_k &= h(X_k) + W_k \end{aligned} \quad (3)$$

预测状态向量 $\hat{X}_{k|k-1}$ 和对应的预测误差协方差矩阵 $P_{k|k-1}$ 为

$$\hat{X}_{k|k-1} = \phi_{k|k-1} \quad (4)$$

$$P_{k|k-1} = \phi_{k|k-1} P_{k-1} \phi_{k|k-1}^T + \Gamma_{k-1} Q_{k-1} \Gamma_{k-1}^T \quad (5)$$

卡尔曼更新校正公式为

$$\begin{aligned} K_k &= P_{k|k-1} h_k^T (h_k P_{k|k-1} + R_k)^{-1} \\ \hat{X}_k &= \hat{X}_{k|k-1} + K_k (Z_k - h_k \hat{X}_{k|k-1}) \\ P_k &= (I - K_k h_k) P_{k|k-1} \end{aligned} \quad (6)$$

式中 $k-1$ ——检测当前时刻

k ——预测时刻

X_k ——状态向量

Z_k ——观测向量

$h(\cdot)$ ——非线性系统的量测矩阵

$f(\cdot)$ ——状态转移矩阵

V_k ——0 均值高斯白噪声

W_k ——0 均值高斯白噪声

Q_k ——观测协方差矩阵

R_k ——测量协方差矩阵

K_k ——卡尔曼增益

P_k ——协方差矩阵

h_k ——距离测量函数在 $\hat{X}_{k|k-1}$ 雅可比矩阵

$\phi_{k|k-1}$ ——状态向量雅可比矩阵

Γ_k ——输入噪声雅可比矩阵

卡尔曼滤波模型的残差 ε_k 计算公式为

$$\varepsilon_k = Z_k - h_k \hat{X}_{k|k-1} - \hat{r}_k \quad (7)$$

卡尔曼量测公式更新为

$$\begin{aligned} K_k &= P_{k|k-1} h_k^T (h_k P_{k|k-1} + R_k)^{-1} \\ \hat{X}_k &= \hat{X}_{k|k-1} + K_k \varepsilon_k \\ P_k &= (I - K_k h_k) P_{k|k-1} \end{aligned} \quad (8)$$

自适应估计器为

$$\hat{r}_k = (1 - d_k) \hat{r}_{k-1} + d_k (Z_k - h_k \hat{X}_{k|k-1}) \quad (9)$$

$$\hat{R}_k = (1 - d_k) \hat{R}_{k-1} + d_k (\varepsilon_k \varepsilon_k^T - h_k P_{k|k-1} h_k^T) \quad (10)$$

其中

$$d_k = \frac{1 - C}{1 - C^{k+1}}$$

式中 \hat{r}_k ——量测噪声方差

C ——遗忘因子,取 0~1

同理加入遗忘因子后可求出状态噪声协方差矩阵 Q_k 为

$$Q_k = (1 - d_k) Q_{k-1} + d_k (K_k \varepsilon_k \varepsilon_k^T K_k^T) \quad (11)$$

2.3 目标追踪模型建立

常见的运动模型有 CV 模型(恒速度模型)、CA(恒加速度模型)和 CTRV(恒速度恒角速度模型)。在农场环境实际场景下,经大量观察与分析发现,多数障碍物处于静止状态。同时,无人驾驶农机无论

是在道路上运移还是在田间作业,其速度变化相对平缓,波动范围较小。基于此,从工程应用的角度出发,为简化模型与分析过程,在一定误差允许范围内,近似地将无人驾驶农机的运动状态视为匀速运动,因此使用 CV 模型作为系统的状态方程。

设运动目标的跟踪状态向量为

$$X(t) = (x, y, v_x, v_y)^T \quad (12)$$

式中 x ——目标在雷达纵向相对位置

y ——目标在雷达横向相对位置

v_x ——目标在雷达纵向速度

v_y ——目标在雷达横向速度

假设 δ_t 时间内目标做匀速运动,可得

$$X(t + \delta_t) = \begin{bmatrix} x + v_x \delta_t \\ y + v_y \delta_t \\ v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \delta_t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \delta_t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ v_x \\ v_y \end{bmatrix} \quad (13)$$

由于采用 CV 模型,则系统中的转移环节为线性环节。设毫米波雷达实际采样频率为 T ,则状态转移矩阵 f 可以表示为

$$f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

3 毫米波雷达与视觉目标匹配策略

3.1 时间匹配

本文视觉目标识别频率为 10 Hz,即更新率为 100 ms,毫米波雷达采集频率为 2 传感器的数据,取二者的更新率最小公倍数时刻作为采集时刻的采样误差最小,即 100 ms 进行采样,然后对 2 传感器采集到的数据进行融合,从而完成视觉传感器与毫米波雷达时间同步。采样示意图如图 9 所示。

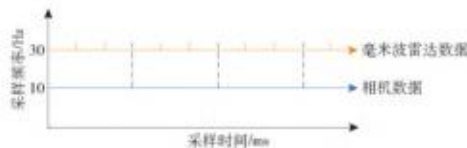


图 9 抽帧采样示意图

Fig.9 Schematic diagram of frame sampling

3.2 空间融合

农机在田间作业时,受地面起伏的影响,车体会与水平地面产生一定的横滚角和俯仰角。传统坐标系变换依赖于相机标定的内外参矩阵。外参矩阵可能因为农机俯仰而改变,从而造成毫米波雷达与视觉传感器的标定出现较大误差。因此,采用直接线

性标定法^[30-32],将毫米波雷达探测到的目标位置信息映射至视觉传感器的像素坐标系下,从而完成 2 传感器的信息融合。毫米波雷达坐标 (x_r, y_r, z_r) 和像素坐标系 (u, v) 之间的转换关系表达式为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{d_x} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{d_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ O^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中 u ——像素坐标系下横坐标

v ——像素坐标系下纵坐标

x_r ——雷达坐标系下横坐标

y_r ——雷达坐标系下纵坐标

z_r ——雷达中目标高度

R ——旋转矩阵

T ——平移矩阵 O ——零矩阵

由于使用的毫米波雷达无法提供目标深度信息,因此转换关系可以简化为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 & k_3 \\ k_4 & k_5 & k_6 \\ k_7 & k_8 & k_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中 K ——雷达与视觉传感器的空间转换矩阵

通过采集多组雷达坐标系和视觉坐标系目标物的位置,如记录目标物 N 组毫米波雷达数据 $\{R_i = (x_i, y_i) | i = 1, 2, \dots, N\}$ 以及对应 N 组像素坐标系 $\{C_i = (u_i, v_i) | i = 1, 2, \dots, N\}$,使用最小二乘法求解转换矩阵 K 中 $k_1 - k_9$ 待定参数。

3.3 毫米波雷达与视觉的目标匹配

本文提出决策级融合,将毫米波雷达与视觉检测数据对同一目标进行匹配,在完成毫米波雷达与视觉传感器的空间和时间同步后,两者的检测信息均位于成像平面像素坐标系中。使用如下融合策略,策略优先级依次降低。

策略 1: 当视觉检测出目标时,且只有一个毫米波雷达目标检测点的投影至视觉目标检测框内,即认为此时视觉传感器和毫米波雷达所检测到的目标为同一目标,输出该目标的距离和类别信息。

策略 2: 当视觉检测出目标时,且有多个毫米波雷达目标检测点的投影至视觉目标检测框内,即认为此时距离视觉检测框中心点最近的雷达检测目标与视觉传感器所检测到的目标为同一目标,输出该目标的距离和类别信息。

策略 3: 视觉框内无雷达投影点时,计算视觉与毫米波雷达输出目标在像素二维平面上的欧氏距离。计算式为

$$r \geq \sqrt{(u_0 - u_s)^2 + (v_0 - v_s)^2} \quad (17)$$

当计算的欧氏距离小于设定阈值时,判定此时视觉传感器和毫米波雷达所检测到的目标为同一目标,通过上述判定机制完成毫米波雷达与视觉融合。

4 试验与结果分析

4.1 改进网络模型验证

4.1.1 试验数据集

本文主要研究农田环境障碍物检测,高质量数据集在采集数据时需要考虑数据多样性,数据多样性有助于提高模型泛化能力,从农机实际作业出发,应该考虑到其作业的各种不同场景,如水田作业、旱地作业以及机耕道行驶等作业场景和天气、光照等自然环境变化的场景。在制作数据集过程需要对采集到的数据进行预处理,需要人工对无效或者造成干扰的数据进行处理,避免造成数据集污染,影响模型识别性能。从不同距离以及不同光照条件下进行图像采集,以保证数据多样性。数据集部分样例如图10所示。



图10 数据集部分样例

Fig. 10 Sample part of the dataset

根据实际情况,从华南农业大学增城试验基地、亳州市谯城区无人化智慧农场示范基地以及湖南省望城无人化智慧农场基地等多个无人化智慧农场采集晴天、阴天和雨天等天气以及在顺光、逆光和曝光等光线下多种目标的图像数据,其中包括行人、水田插秧机、轮式拖拉机和汽车等,数据集标注时也将这些目标物分为4类,原始图像使用Labelme标注软件进行标注,标注后得到文件格式为JSON标注信息,通过数据转换把JSON格式转换成VOC标注格式,最后将转换好的文件放入对应训练文件夹中。各类目标数量如表1所示。

表1 数据集中各类目标数量

Tab. 1 Number of targets in each category in the dataset

类别	数量
行人	357
水田插秧机	336
轮式拖拉机	336
汽车	332

卷积神经网络的性能需要大量的数据支撑才能表现出来,因此,为了充分发挥神经网络性能,训练时对数据集进行图像增强,数据增强方法包括缩放、平移、旋转、翻转、色彩变换以及随机裁剪等。

4.1.2 农田障碍物数据集下消融试验

在YOLO v5s模型基础上,使用轻量级GhostNetV2作为主干网络减少模型参数量;构建AVCStem模块搭建轻量颈部网络结构进行特征融合,添加BIFPN加强对特征的提取。为验证不同改进方法对模型性能的影响,验证各改进方法有效性,在测试集上进行5组消融试验,试验结果如表2所示,其中√表示引入相应的改进方法。

表2 消融试验结果

Tab. 2 Ablation test results

试验编号	方法				精确率/%	召回率/%	mAP@0.5/%	模型参数量
	YOLO v5s	GhostNetV2	AVCStem	BIFPN				
1	√				95.6	92.4	96.5	7.021×10^6
2	√	√			95.1	87.9	93.6	5.814×10^6
3	√		√		95.2	92.1	95.8	5.552×10^6
4	√	√	√		94.6	90.6	95.3	4.345×10^6
5	√	√	√	√	95.8	92.9	97.0	4.198×10^6

从表2可知,构建的GhostNetV2 - AVCStem - BIFPN - YOLO v5s模型展现出最为卓越的综合性能。

4.1.3 不同模型识别效果试验

为进一步验证改进模型性能,采用自制数据集对改进YOLO v5s、轻量级模型YOLO v4 - Tiny、

YOLO v7 - Tiny以及经典YOLO检测算法YOLO v4和YOLO v7模型进行识别效果试验,识别效果如图11所示。

以mAP作为识别效果评价指标,不同网络模型识别效果指标如表3所示。

改进YOLO v5s模型检测速度与原始YOLO v5s



图 11 不同模型识别效果

Fig. 11 Recognition effect of different models

表 3 不同检测算法模型识别效果评价指标

Tab. 3 Experimental comparison of different detection algorithm models

网络模型	mAP@0.5/ %	模型 参数量	浮点 运算量	检测 速度/ ms	模型内 存占用 量/MB
YOLO v5s	96.5	7.02×10^6	1.580×10^{10}	14.0	14.4
YOLO v4 - Tiny	93.0	6.20×10^6	1.280×10^{10}	17.2	22.5
YOLO v7 - Tiny	94.8	6.01×10^6	1.320×10^{10}	18.9	23.1
YOLO v4	96.6	6.436×10^7	1.603×10^{11}	51.2	244.0
YOLO v7	96.8	3.720×10^7	3.720×10^{10}	16.4	71.3
改进 YOLO v5s	97.0	4.20×10^6	9.40×10^9	13.2	8.9

相近,但模型参数量、浮点运算量和模型内存占用量仅分别为 YOLO v5s 模型的 40.2%、39.2% 和 38.2%。与其他模型相比检测速度更快,mAP@0.5 最高、模型参数量最小、内存占用量最小,通过综合分析,可以发现改进模型在性能上显著超过了其他网络模型。

4.2 雷达与视觉融合方法避障试验

为了进一步验证本文融合算法的实用性,针对不同场景障碍物进行试验,分别为白天和黑夜田间试验。试验平台主要由无人驾驶水稻播种机、嵌入式工控机 G3750F - P4 V1.0(G670) 、SR73F 毫米波雷达、瑞尔威视觉单目相机、无人驾驶控制器等组成,如图 12 所示。毫米波雷达和相机分别通过 CAN 总线和 USB 接口与嵌入式工控机连接,嵌入式工控机与无人驾驶农机的无人驾驶控制器通过 CAN 总线通讯。本文所述的毫米波雷达与视觉融合的感知算法布署在嵌入式工控机上,设定无人驾

驶农机行驶的安全区域,当融合感知算法输出的目标位置在农机行驶的安全区域内则判断为农机前方出现障碍物,通过 CAN 向无人驾驶控制器发送指令,进行停车避障等操作。无人驾驶水稻播种机幅宽为 2.6 m,行驶速度为 1 m/s,雷达过滤系数 a 取 1.5, b 取 30。

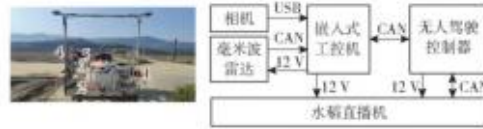


图 12 试验平台

Fig. 12 Test platform

- 1. 工控机 2. 毫米波雷达 3. 相机 4. 无人驾驶控制器 5. 水稻播种机

应用融合算法在光照良好的农田场景下试验结果如图 13 所示,图像上的矩形框为视觉检测结果,绿点为雷达在图像中的投影点。此场景下视觉对农机以及行人等目标识别效果良好,毫米波雷达对检测范围内的目标识别正确,通过上述融合规则将 2 传感器的输出目标进行融合,获得较好的检测效果。在夜间开展作业时,由于田间无照明装置,开启无人驾驶水稻播种机的车灯后进行相关试验,如图 14 所示,视觉算法在这种情况下出现了明显漏检。不同检测方法避障试验效果如表 4 所示。



图 13 白天场景下检测效果

Fig. 13 Detection effect in daytime scene

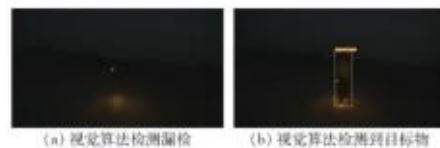


图 14 视觉算法黑夜试验效果

Fig. 14 Visual algorithm night time test

由表 4 可知,在白天场景下,单毫米波雷达识别准确率为 89.44%,单视觉相机识别准确率为 77.04%,而本文提出的融合方法识别准确率达 92.11%。相较于单雷达,融合方法准确率提升 2.67 个百分点;相较于单视觉,融合方法准确率提升 15.07 个百分点,融合后的算法可以解决毫米波雷达无法确定障碍物类别的问题,同时解决视觉在夜间无法有效检测目标物以及无法感知目标物距离的问题,相比单一传感器整体的准确性得到有效提高。

表4 不同检测方法避障试验结果

Tab.4 Results of obstacle avoidance tests using different detection methods

作业场景	传感器	目标总数	正确识别数	准确率/%
白天	相机	710	547	77.04
	雷达		635	89.44
	融合		654	92.11
黑夜	相机	120	37	30.83
	雷达		112	93.33
	融合		114	96.67

采用 AEKF 跟踪算法更新测量误差和过程噪声,对图 13 中检测目标进行跟踪,误差如表 5 所示,AEKF 算法纵、横向均方根误差和位置偏差均优于 EKF 算法,跟踪精度更高。

表5 毫米波雷达跟踪误差

Tab.5 Millimeter-wave radar tracking errors m

跟踪算法	横向均方根误差	纵向均方根误差
EKF 算法	0.153	0.086
AEKF 算法	0.140	0.077

为验证毫米波雷达与视觉融合感知避障算法的实际应用效果,开展多场景毫米波雷达与视觉融合的避障试验。图 15 为白天和夜间不同光照环境试验和多机跟随行驶试验场景。无人驾驶水稻播种机在道路运移和田间作业速度为 0.7~1.5 m/s,行人行走速度为 1 m/s。安全避障区域设定为农机行驶



图 15 农机避障场景

Fig.15 Scenario diagram of obstacle avoidance for agricultural machines

前方 4 m 以及横向方向上 4 m,试验结果表明融合感知避障算法均能检测到障碍物并停车避障。

5 结论

(1) 针对深度视觉算法参数量大、计算量大、模型体积大等问题,轻量化改进了 YOLO v5s 算法,使用 GhostNetV2 替换主干网络的 C3 模块,使用 VOVGSCSPC 结构和 AKConv 模块构建 AVCStem 结构精简特征融合网络结构,在颈部加入 BIFPN 网络,改进模型性能与原模型相近,但模型参数量、浮点运算量、模型内存占用量仅分别为 YOLO v5s 模型的 40.2%、39.2% 和 38.2%。

(2) 设计了一种毫米波雷达数据处理方法,对毫米波雷达异常数据根据雷达技术参数表进行剔除,通过设定雷达感兴趣区域对之外的目标进行过滤处理,使用 DBSCAN 聚类算法对重复数据进行剔除;采用自适应扩展卡尔曼滤波追踪算法,借助遗忘因子自适应更新测量误差和过程噪声,提高雷达追踪目标的精度。

(3) 以无人驾驶农机为试验平台,以实际作业为试验背景,对毫米波雷达与视觉融合的无人驾驶农机行驶前方目标障碍物检测算法在多场景中进行试验验证。试验结果表明,在白天试验场景中本文提出的融合方法相较于雷达与视觉识别准确率分别提高 2.67、15.07 个百分点,在夜间试验场景融合检测方法有效地弥补了相机失效的情况。华南农业大学增城试验基地应用试验结果表明,融合算法均能成功识别障碍物并与无人驾驶控制器通讯,实现无人驾驶农机停车避让,为无人化智慧农场提供了安全技术支撑。

参 考 文 献

- [1] 罗锡文,胡炼,何杰,等.中国大田无人农场关键技术与建设实践[J].农业工程学报,2024,40(1):1-16.
LUO Xiwen, HU Lian, HE Jie, et al. Key technologies and practice of unmanned farm in China [J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(1): 1-16. (in Chinese)
- [2] 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 Yuhuan, 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)
- [3] 罗锡文,廖娟,胡炼,等.我国智能农机的研究进展与无人农场的实践[J].华南农业大学学报,2021,42(6):8-17,5.
LUO Xiwen, LIAO Juan, HU Lian, et al. Research progress of intelligent agricultural machinery and practice of unmanned farm in China [J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(6): 8-17, 5. (in Chinese)
- [4] 何勇,蒋浩,方慧,等.车辆智能障碍物检测方法及其农业应用研究进展[J].农业工程学报,2018,34(9):21-32.
HE Yong, JIANG Hao, FANG Hui, et al. Research progress of intelligent obstacle detection methods of vehicles and their application on agriculture [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(9): 21-32. (in Chinese)
- [5] 薛金林,闫嘉,范博文.多类农田障碍物卷积神经网络分类识别方法[J].农业机械学报,2018,49(增刊):35-41.
XUE Jinlin, YAN Jia, FAN Bowen. Classification and identification method of multiple kinds of farm obstacles based on convolutional neural network [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 35-41.

- [6] NISSIMOV S, GOLDBERGER J, ALCHANATIS V. Obstacle detection in a greenhouse environment using the Kinect sensor [J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2015, 113: 104–115.
- [7] 薛金林,程峰,汪冰清,等.基于无效目标滤除的毫米波雷达农田障碍物检测方法[J].*农业机械学报*,2023,54(4):233–240.
XUE Jinlin, CHENG Feng, WANG Bingqing, et al. Method for millimeter wave radar farm obstacle detection based on invalid target filtering [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(4): 233–240. (in Chinese)
- [8] 万欢,欧媛珍,管宪鲁,等.无人农机作业环境感知技术综述[J].*农业工程学报*,2024,40(8):1–18.
WAN Huan, OU Yuanzhen, GUAN Xianlu, et al. Review of the perception technologies for unmanned agricultural machinery operating environment [J]. *Transactions of the CSAE*, 2024, 40(8): 1–18. (in Chinese)
- [9] ZOU Z, CHEN K, SHI Z, et al. Object detection in 20 years: a survey [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2023, 111(3): 257–276.
- [10] 郝帅,杨磊,马旭,等.基于注意力机制与跨尺度特征融合的YOLO v5输电线路故障检测[J].*中国电机工程学报*,2023,43(6):2319–2331.
HAO Shuai, YANG Lei, MA Xu, et al. YOLO v5 transmission line fault detection based on attention mechanism and cross-scale feature fusion [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(6): 2319–2331. (in Chinese)
- [11] KAUR R, SINGH S. A comprehensive review of object detection with deep learning [J]. *Digital Signal Processing*, 2023, 132: 103812.
- [12] 刘慧,张礼帅,沈跃,等.基于改进SSD的果园行人实时检测方法[J].*农业机械学报*,2019,50(4):29–35,101.
LIU Hui, ZHANG Lishuai, SHEN Yue, et al. Real-time pedestrian detection in orchard based on improved SSD [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(4): 29–35, 101. (in Chinese)
- [13] 陈斌,张漫,徐弘祺,等.基于改进YOLO v3-tiny的全景图像农田障碍物检测[J].*农业机械学报*,2021,52(增刊):58–65.
CHEN Bin, ZHANG Man, XU Hongzhen, et al. Farmland obstacle detection in panoramic image based on improved YOLO v3-tiny [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(Supp.): 58–65. (in Chinese)
- [14] 蔡舒平,孙仲鸣,刘慧,等.基于改进型YOLOv4的果园障碍物实时检测方法[J].*农业工程学报*,2021,37(2):36–43.
CAI Shuping, SUN Zhongming, LIU Hui, et al. Real-time detection methodology for obstacles in orchards using improved YOLOv4 [J]. *Transactions of the CSAE*, 2021, 37(2): 36–43. (in Chinese)
- [15] 杨昊霖,王其欢,李华彪,等.基于改进YOLOv5的田间复杂环境障碍物检测[J].*中国农机化学报*,2024,45(6):216–222.
YANG Haolin, WANG Qihuan, LI Huabiao, et al. Obstacle detection in complex farmland environment based on improved YOLOv5 [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2024, 45(6): 216–222. (in Chinese)
- [16] 张炳力,詹叶辉,潘大巍,等.基于毫米波雷达和机器视觉融合的车辆检测[J].*汽车工程*,2021,43(4):478–484.
ZHANG Bingli, ZHAN Yehui, PAN Dawei, et al. Vehicle detection based on fusion of millimeter-wave radar and machine vision [J]. *Automotive Engineering*, 2021, 43(4): 478–484. (in Chinese)
- [17] WANG J G, CHEN S J, ZHOU L B, et al. Vehicle detection and width estimation in rain by fusing radar and vision [C] // 15th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV). IEEE, 2018: 1063–1068.
- [18] 赵望宇,李必军,单云霄,等.融合毫米波雷达与单目视觉的前车检测与跟踪[J].*武汉大学学报(信息科学版)*,2019,44(12):1832–1840.
ZHAO Wangyu, LI Bijun, SHAN Yunxiao, et al. Vehicle detection and tracking based on fusion of millimeter wave radar and monocular vision [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(12): 1832–1840. (in Chinese)
- [19] 甘耀东,郑玲,张志达,等.融合毫米波雷达与深度视觉的多目标检测与跟踪[J].*汽车工程*,2021,43(7):1022–1029,1056.
GAN Yaodong, ZHENG Ling, ZHANG Zhida, et al. Multi-target detection and tracking with fusion of millimeter-wave radar and deep vision [J]. *Automotive Engineering*, 2021, 43(7): 1022–1029, 1056. (in Chinese)
- [20] 李勇滔,孙晨旭,那伟光,等.基于毫米波雷达与视觉融合的碰撞预警[J].*汽车工程*,2023,45(9):1666–1676.
LI Yongtao, SUN Chenxu, ZHENG Weiguang, et al. Collision warning based on fusion of millimeter wave radar and vision [J]. *Automotive Engineering*, 2023, 45(9): 1666–1676. (in Chinese)
- [21] 白强,高荣华,赵春江,等.基于改进YOLOV5s网络的奶牛多尺度行为识别方法[J].*农业工程学报*,2022,38(12):163–172.
BAI Qiang, GAO Ronghua, ZHAO Chunjiang, et al. Multi-scale behavior recognition method for dairy cows based on improved YOLOV5s network [J]. *Transactions of the CSAE*, 2022, 38(12): 163–172. (in Chinese)
- [22] 尚钰莹,张倩如,宋怀波.基于YOLOv5s的深度学习在自然场景苹果花朵检测中的应用[J].*农业工程学报*,2022,38(9):222–229.
SHANG Yuying, ZHANG Qianru, SONG Huaibo. Application of deep learning using YOLOv5s to apple flower detection in natural scenes [J]. *Transactions of the CSAE*, 2022, 38(9): 222–229. (in Chinese)
- [23] HAN K, WANG Y, TIAN Q, et al. Ghostnet: more features from cheap operations [C] // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2020: 1580–1589.
- [24] TANG Y, HAN K, GUO J, et al. GhostNetv2: enhance cheap operation with long-range attention [J]. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2022, 35: 9969–9982.
- [25] HULIN L, JUN L, HANBING W, et al. Slim-neck by GSCov: a lightweight-design for real-time detector architectures [J].

- Journal of Real-Time Image Processing, 2024, 21(3): 1–13.
- [26] ZHANG X, SONG Y, SONG T, et al. AKConv: convolutional kernel with arbitrary sampled shapes and arbitrary number of parameters [J]. arXiv preprint arXiv: 2311.11587, 2023.
- [27] WANG K, LIEW J H, ZOU Y, et al. Panet: few-shot image semantic segmentation with prototype alignment [C] // Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, 2019: 9197–9206.
- [28] CHEN J, MAI H S, LUO L, et al. Effective feature fusion network in BIFPN for small object detection [C] // IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). IEEE, 2021: 699–703.
- [29] FUJII K. Extended Kalman filter [J]. Reference Manual, 2013, 14: 41.
- [30] OH J, KIM K S, PARK M, et al. A comparative study on camera-radar calibration methods [C] // 15th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV). IEEE, 2018: 1057–1062.
- [31] 胡延平, 刘非, 魏振亚, 等. 毫米波雷达与视觉传感器信息融合的车辆跟踪 [J]. 中国机械工程, 2021, 32(18): 2181–2188.
HU Yanping, LIU Fei, WEI Zhenya, et al. Vehicle tracking of information fusion for millimeter-wave radar and vision sensor [J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(18): 2181–2188. (in Chinese)
- [32] 梁新成, 刘鹏, 李云伍, 等. 融合毫米波雷达与机器视觉的田间道路视觉引导线提取 [J]. 农业工程学报, 2023, 39(19): 141–153.
LIANG Xincheng, LIU Peng, LI Yunwu, et al. Fusion of millimeter wave radar and machine vision for visual guide line extraction on field roads [J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(19): 141–153. (in Chinese)

《农业机械学报》第十届编辑委员会

(按姓氏笔画为序)

- 荣誉主任委员：汪懋华 冯炳元 诸慎友
主任委员：罗锡文
主编：任露泉
执行主编：苑严伟
副主任委员：任发政 闫楚良 杜太生 李天来 吴善特 应义斌
陈志 陈学庚 赵春江 郑文聚 袁寿其 康绍忠
方宪法 李红 赵凤敏 韩鲁佳
于海业 马旭 王相友 毛罕平 冯仲科 权龙
丁为民 刘瑞雯 江连洲 李萍萍 杨学军 何东健 张全国
刘荣厚 陈海涛 尚书旗 周志立 贾洪雷 姬长英
陈巧敏 王俊 王巧华 王东伟 王伟 王全九 王庆杰 王金武
编委：丁幼春 王金峰 王德成 毛文华 付君 付强 朱艳 朱立学
王金星 朱孝勇 朱德泉 任建强 刘东 刘木华 刘立晶 刘成良 刘继展
朱孝勇 衣淑娟 汤方平 许童羽 坎杂 杜小强 李久生 李云开
刘燕德 李志合 李保国 李洪文 李景彬 李道亮 杨洲 杨万能
李民赞 杨然兵 杨福增 何进 何勇 邹小波 汪小昂 汪若尘
杨信廷 沈明霞 宋正河 宋怀波 张永 张超 张漫 张兆国 张若宇
沈明霞 张德胜 苑进 尚松浩 易维明 金诚谦 周俊 周海燕 陈黎杰
张领先 武传宇 苑志军 赵立欣 赵武云 赵茂程 赵燕东 郝建军 胡炼
武传宇 胡志超 胡建军 胡笑涛 俞高红 徐立友 徐立章 徐俊增 郭俊先
胡志超 姬江涛 黄玉祥 黄东岩 曹成茂 曹光乔 崔清亮 蒋雪松 韩英
姬江涛 韩文登 韩志武 臧英 廖庆喜 薛金林 薛新宇
- 外籍编委：Abdul M Mouazen Ce Yang Chao Chen Chung Sun Ok
Ghulam Hussain Guoming Li Hak-jin Kim Jianfeng Zhou
Kang Kang Liangliang Yang Long He Manoj Karkee
Naiqian Zhang Nick Sigrimis Ning Wang Noboru Noguchi
Sergio Castro-García Siva K Balasundram Stavros G Vougioukas Wei Guo
Wenqiao Yuan Xin Sun Yubin Lan Yuzhen Lu
Zhiming Qi Zhiwei Zeng Zhou Zhang
- 青年编委：(第二届) 于丰华 王一甲 王韦韦 王纪章 王娟 尤泳 石林榕 卢彩云
申孝军 冯青春 冯德军 权辉 朱广飞 刘世晶 刘羊 刘孟楠
刘媛媛 齐江涛 闫祥海 关卓怀 孙红 孙良 李仙岳 李江波
李莱威 李斌 李臻 杨洋 杨晓 肖茂华 吴尚蓉 吴敏
邱威 何杰 汪六三 沈成 张开兴 张青松 张俊 张振国
张喜瑞 陆健强 陈雨 陈国平 陈桂鹏 陈皓锐 范军亮 林柱湖
金秀良 金鑫 周文琪 周脉乐 郑恩米 赵志桓 赵佳乐 赵博
胡少军 秦宽 徐文道 徐赛 奚小波 高筱钧 郭万金 郭文斌
唐汉 黄小毛 黄成龙 崔冰波 隋媛媛 韩长杰 韩科立 程金鹏
傅隆生 童俊华 温昌凯 耶小安 赖庆辉 雷小龙 廖宜涛 翟长远
翟肇裕 熊俊涛 操信春 戴飞 魏忠彩
- 编辑部主任：陆海燕 编辑部副主任：韩英 虎树杰 编辑：唐金秋 陈亮 杨子怡 郭春春



封面设计：吴雨城

4.1 大田无人化智慧农场



内 容 简 介

无人化智慧农场是智慧农业的主要实现方式,是一个多学科交叉的应用领域,涉及农业工程、车辆工程、控制工程、计算机科学与技术、机器人工程等,并融合了自动驾驶、机器视觉、深度学习、遥感信息和农机-农艺融合等前沿技术。

本书的作者为高校从事智慧农业方向的教师、科研人员和研究生,依托“无人化智慧农场”团队的教研与推广实践,全面详细地介绍了大田无人化智慧农场的技术体系,内容涵盖了从农场规划建设至运行维护所涉及的各个环节,重点阐述支撑农场高效生产的智能农机装备的相关理论与方法,特别是线控底盘、卫星定位、路径规划、导航控制、自动驾驶和多机协同等。本书适合作为现代农业研究人员和应用技术人员的参考资料,也可作为农业工程、智慧农业和车辆工程等相关专业研究生、本科生和专科生学习资料。

图书在版编目(CIP)数据

大田无人化智慧农场/罗锡文,胡炼主编.--北京:中国农业大学出版社,2024.12.
ISBN 978-7-5655-3346-4

I. S126

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2024JS6117 号

书 名 大田无人化智慧农场

Datian Wurenhua Zhihui Nongchang

作 者 罗锡文 胡 炼 主 编

总 策 划	王 筠 利 丛 锐 红 张 秀 环	责任编辑	刘 聪 石 华 蔡 恩 嘉
策 划 编 辑	刘 聪 石 华	封面设计	中通世奥图文设计中心
出版发行	中国农业大学出版社		
社 址	北京市海淀区圆明园西路2号	邮政编码	100193
电 话	发行部 010-62733489,1190	读者服务部	010-62732335
	编辑部 010-62732617,2618	出 版 部	010-62733440
网 址	http://www.caupress.cn	E-mail	cbsszs@cau.edu.cn
经 销	新华书店		
印 刷	涿州市星河印刷有限公司		
版 次	2024年12月第1版 2024年12月第1次印刷		
规 格	185 mm×260 mm 16开本 23.5印张 509千字		
定 价	128.00元		

图书如有质量问题本社发行部负责调换

编委会

主 编:罗锡文 胡 炼

副主编:何 杰 赵润茂

编 委:汪 沛 黄培奎 陈高隆 涂因鹏

第1章 绪论	1
1.1 农业机械化发展阶段概述	1
1.1.1 1.0 原始生产阶段	1
1.1.2 2.0 传统生产阶段	2
1.1.3 3.0 机械化生产阶段	2
1.1.4 4.0 智慧化生产阶段	3
1.2 大田无人化智慧农场的发展需求	3
1.2.1 现代农业发展的需求	3
1.2.2 解决“谁来种地”和“怎样种地”的需求	4
第2章 大田无人化智慧农场概述	6
2.1 大田无人化智慧农场的概念	6
2.2 大田无人化智慧农场的系统架构	6
2.3 大田无人化智慧农场的关键技术	7
2.3.1 数字化感知技术	7
2.3.2 智能化决策	10
2.3.3 精准化作业	11
2.3.4 智慧化管理	14
参考文献	15
第3章 大田无人化智慧农场基础设施	16
3.1 大田无人化智慧农场整体规划	16
3.2 农场仓储设施建设	16
3.2.1 农机机库	16
3.2.2 粮仓与物料仓库	17
3.3 大田无人化智慧农场的农田建设	17
3.3.1 规模化	17
3.3.2 宜机化	18
3.3.3 田间道路	19
3.3.4 农田标准化改造模式	20



3.4 田间智能设施建设	21
3.4.1 灌溉设施	21
3.4.2 电力设施	21
3.4.3 传感器设施	21
3.5 农田建设案例	21
第4章 大田作业农机构造基础	23
4.1 大田作业农机概述	23
4.2 农机转向系统	23
4.2.1 前轮转向	24
4.2.2 后轮转向	26
4.2.3 四轮转向	27
4.2.4 折腰转向	27
4.2.5 差速转向	29
4.3 农机动力与机具连接	30
4.3.1 电控液压三点悬挂系统	30
4.3.2 快速连接结构	32
4.3.3 PTO 动力输出	34
4.3.4 液压输出阀组	35
4.4 总纵技术	35
4.4.1 SAE J1939	35
4.4.2 ISO 11783	36
4.4.3 ISOBUS	36
4.5 底盘纵控技术	38
4.5.1 概念	38
4.5.2 线控底盘中的典型技术	39
参考文献	42
第5章 数字化感知关键技术	43
5.1 作业环境信息感知	43
5.1.1 高精度地图	43
5.1.2 水、温度、气象	50
5.1.3 土壤	52
5.1.4 水田硬度层感知	53
5.2 作业对象信息感知	69
5.2.1 作物长势	69
5.2.2 病虫害	73
5.2.3 处方图	75

5.3 作业机械信息感知.....	79
5.3.1 农机机械的性能参数.....	79
5.3.2 传感器加装与测量方法.....	80
5.3.3 测得数据的使用方法.....	80
5.3.4 具体农机实例说明.....	81
参考文献.....	81
第6章 路径规划关键技术	84
6.1 运移路径规划.....	84
6.1.1 基于路网的双向 Dijkstra 运移路径规划算法.....	84
6.1.2 运移路径试验验证.....	86
6.2 不同地块形状作业路径规划.....	88
6.2.1 轮廓形状的描述指标.....	88
6.2.2 作业路径规划.....	91
6.3 农机转弯路径规划方式.....	95
6.3.1 弓形、半圆形、鱼尾形转弯算法.....	97
6.3.2 “ \square ”形“ M ”形转弯算法.....	100
6.3.3 螺旋式转弯算法.....	102
6.4 全覆盖作业路径规划.....	107
6.4.1 耕作环节路径规划.....	108
6.4.2 种植环节路径规划.....	108
6.4.3 管理环节路径规划.....	109
6.4.4 收获环节路径规划.....	109
6.4.5 开边/封园路径规划.....	109
6.4.6 多约束全覆盖路径规划.....	111
6.5 避障路径规划.....	113
6.5.1 直接构造法.....	114
6.5.2 样条曲线.....	116
6.6 智能路径规划算法.....	117
6.6.1 智能全局路径规划.....	117
6.6.2 智能局部路径规划.....	123
参考文献.....	125
第7章 农机无人驾驶控制关键技术	126
7.1 定位技术.....	126
7.1.1 全球卫星导航系统.....	126
7.1.2 多传感器融合定位技术.....	131
7.1.3 单天线 GNSS/INS 组合导航.....	133

7.2 农机无人驾驶坐标系统	157
7.2.1 参考坐标系建立	157
7.2.2 坐标系转换	158
7.3 导航控制技术	159
7.3.1 农机运动的数学模型	159
7.3.2 农机转向控制	165
7.3.3 路径跟踪控制	170
参考文献	176
第8章 精准作业关键技术	178
8.1 精准耕整	178
8.1.1 耕深监测与自动控制	178
8.1.2 动力自适应匹配	182
8.1.3 精准平整	184
8.2 精准种植	193
8.2.1 水稻育秧播种(密植、钵苗、钵毯苗)	193
8.2.2 精量直播	197
8.3 精准管理	200
8.3.1 水管理	200
8.3.2 肥管理	209
8.3.3 药管理	212
8.3.4 草管	215
8.4 精准收获	221
8.4.1 精准对行	221
8.4.2 喂入量估计	224
8.4.3 自动卸粮	228
8.4.4 智能测产	233
参考文献	235
第9章 协同作业关键技术	238
9.1 主从协同作业关键技术	238
9.1.1 等待模式	238
9.1.2 跟随模式	245
9.2 多机协同作业关键技术	250
9.2.1 地面农机群体协同作业	250
9.2.2 多机协同作业	257
9.3 人机协同作业关键技术	261
9.3.1 人机协同作业技术概述	261

9.3.2 无人和人工驾驶农机协同作业区域的划分	261
9.4 不同生产环节协同关键技术	262
9.4.1 耕整地作业场景	263
9.4.2 种植作业场景	264
9.4.3 植保作业场景	266
9.4.4 收获作业场景	266
参考文献	267
第 10 章 智慧化管理关键技术	269
10.1 信息传输	269
10.1.1 物联网	269
10.1.2 4G/5G	271
10.2 作物生长管理	272
10.3 智能农机管理	278
10.4 农场管理	281
10.4.1 农事管理:全程精细化与智能化	281
10.4.2 农资管理:精准化与绿色化	285
10.4.3 经营管理:节本增效与可持续发展	285
10.5 无人农机管控平台	286
10.5.1 无人农机管控平台概述	286
10.5.2 无人农机管控平台的架构设计	287
10.5.3 相关案例	288
参考文献	292
第 11 章 大田无人化智慧农场安全技术	293
11.1 大田无人化智慧农场安全概述	293
11.2 大田无人化智慧农场安全技术	294
11.2.1 路径规划	294
11.2.2 主动感知	295
11.2.3 车路协同	301
11.2.4 碰撞接触	304
11.2.5 急停避障	305
11.2.6 信息安全	311
11.3 安全系统设计	317
11.3.1 安全系统功能设计	317
11.3.2 安全功能冗余设计	320
11.3.3 安全规范	322
参考文献	325

第 12 章 大田无人化智慧农场应用	326
12.1 大麦无人化智慧农场实践(Hands Free Hectare project)	326
12.2 广东增城水稻无人化智慧农场	326
12.2.1 项目背景	326
12.2.2 无人化作业实施	328
12.2.3 建设成效	332
12.3 湖南大通湖再生稻无人化智慧农场	332
12.3.1 项目背景	332
12.3.2 无人化作业实施	333
12.3.3 建设成效	340
12.4 上海联适水稻无人化智慧农场	341
12.4.1 项目背景	341
12.4.2 无人化作业实施	341
12.4.3 建设成效	346
12.5 安徽三山大田无人化智慧农场	346
12.5.1 项目背景	346
12.5.2 无人化作业实施	346
12.5.3 社会效益	349
12.6 黑龙江七星大田无人化智慧农场	349
12.6.1 项目背景	349
12.6.2 水稻生产智能化流程	350
12.6.3 小麦生产全程无人化	350
12.6.4 建设成效	351
第 13 章 发展与展望	352
13.1 发展机遇与挑战	352
13.1.1 发展机遇	352
13.1.2 面临挑战	353
13.2 发展趋势展望	354
13.2.1 关键技术创新发展	354
13.2.2 应用规模和场景不断拓展	355
13.2.3 产业体系逐步完善	355

1.1. 专利授权证书：农机作业路径规划方法、装置

证书号第8623088号





专利公告信息

发明专利证书

发明名称：农机作业路径规划方法、装置

专利权人：华南农业大学

地址：510610 广东省广州市天河区五山

发明人：黄培奎;邓成泰;胡炼;赵润茂;汪沛;何杰;高锐涛;张闻宇
谢佳生;李佳虹;徐仁

专利号：ZL 2024 1 1425597.4 授权公告号：CN 119085660 B

专利申请日：2024年10月13日 授权公告日：2026年01月02日

申请日时申请人：华南农业大学

申请日时发明人：黄培奎;邓成泰;胡炼;赵润茂;汪沛;何杰;高锐涛;张闻宇
谢佳生;李佳虹;徐仁

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法进行审查，决定授予专利权，并予以公告。
专利权自授权公告之日起生效。专利权有效性及专利权人变更等法律信息以专利登记簿记载为准。

局长
申长雨






2026年01月02日


第1页(共1页)



1.2. 实用新型专利授权证书：一种手自一体线控系统、无人化收获机及试验装置

证书号第23348664号





专利公告信息

实用新型专利证书

实用新型名称：一种手自一体线控系统、无人化收获机及试验装置

专利权人：华南农业大学

地址：510610 广东省广州市天河区五山

发明人：黄培奎;孙正;胡炼;赵润茂;汪沛;何杰;高锐涛;张闻宇
梁顺达;徐仁;李佳虹

专利号：ZL 2024 2 2517627.6 授权公告号：CN 223349120 U

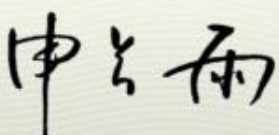
专利申请日：2024年10月18日 授权公告日：2025年09月19日


申请日时申请人：华南农业大学

申请日时发明人：黄培奎;孙正;胡炼;赵润茂;汪沛;何杰;高锐涛;张闻宇
梁顺达;徐仁;李佳虹

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法进行审查，决定授予专利权，并予以公告。
专利权自授权公告之日起生效。专利权有效性及专利权人变更等法律信息以专利登记簿记载为准。

局长
申长雨





2025年09月19日

第1页(共1页)

1.3. 软件著作登记证书：Unity3D 拖拉机自动驾驶仿真系统
V1.0



2.1. 农业技术装备全国重点实验室

中国农业机械化科学研究院集团有限公司

关于开展农业装备技术全国重点实验室 建设工作的函

华南农业大学、中国农业大学、浙江大学：

根据科技部、国务院国资委开展信息、农业、制造领域全国重点实验室建设工作的有关通知，农业装备技术全国重点实验室已经批复建设。农业装备技术全国重点实验室（以下简称“重点实验室”）是在土壤植物机器系统技术国家重点实验室基础上，由中国农业机械化科学研究院集团有限公司牵头，联合华南农业大学、中国农业大学、浙江大学共建，设置土壤植物机器系统技术、耕种机械装备技术、田间管理作业装备技术、收获装备技术、自主作业装备技术等5大研究方向，着力建立自主可控的农业装备技术及产品体系，实现高水平科技自立自强。现将有关建设工作要求通知如下：

（1）加大支撑保障。各单位要按照重点实验室战略定位和建设要求，对布局在本单位的创新团队给予人员编制、经费投入、资源配置、科研场地、仪器设备、科技激励等方面的支持保障，并在科研人员职称职务晋升方面切实打破“四唯”评价，建立以创新价值、能力、贡献为导向的评价体系。

(2) 强化科技创新。各单位创新团队要按照重点实验室统一规划布局和工作安排，聚焦重点实验室方向目标，扎实开展科研工作，强化创新协同，推动产出战略性、关键性、原创性重大科技成果，实现科研攻关和人才一体化发展。

(3) 做好管理运行。各单位、创新团队要按照重点实验室统一要求做好日常运行、总结评估、评审评价、学术交流、科技合作等管理工作；要做好保密管理，不搞挂牌仪式，不做宣传报道。建设运行过程中有关的问题或意见建议可与中国农业机械化科学研究院集团有限公司科技发展部联系。

联系人：周海燕

联系电话：010-64882239

中国农业机械化科学研究院集团有限公司

2022年12月30日



姓名	性别	年龄	职称	职务	学历	现从事专业	在中心承担的任务	所在单位	签名
胡炼	男		教授	副主任	博士研究生	农业电气化与自动化	无人农场管控平台首席科学家	华南农业大学	
何杰	男		副教授	副主任	博士研究生	农业电气化与自动化	水稻无人农机技术与装备首席专家	华南农业大学	
李君	男		教授	院长	博士研究生	车辆工程	果园信息化系统与智能装备首席专家	华南农业大学	
周志艳	男		教授	无	博士研究生	农业生物环境与能源工程	农业航空关键技术与装备首席专家	华南农业大学	
肖德琴	女		教授	无	博士研究生	农业电气化与自动化	家禽智慧农场关键技术与装备首席专家	华南农业大学	
汪沛	女		副教授	无	博士研究生	农业电气化与自动化	无人农场管控平台	华南农业大学	
张智刚	男		副教授	无	博士研究生	农业机械化工程	农业机械智能导航及自动作业	华南农业大学	
臧英	女		教授	副主任	博士研究生	农业机械化工程	农情信息感知及精准管控	华南农业大学	

曾山	男		研究员	无	博士研究生	农业机械化工程	种植机械智能导航及自动作业	华南农业大学	
王在满	男		研究员	无	博士研究生	农业机械化工程	水田种植机械智能导航及自动作业	华南农业大学	
杨文武	男		副教授	无	博士研究生	农业机械化工程	水稻智能化种植装备	华南农业大学	
辜松	男		教授	无	博士研究生	农业工程	设施农业关键技术与装备	华南农业大学	
高锐涛	男		教授	副院长	博士研究生	农业机械化工程	农业机械设计与优化	华南农业大学	
廖娟	女		助理研究员	无	博士研究生	农业工程	作物病虫害及营养胁迫信息感知	华南农业大学	
刘庆庭	男		教授	无	博士研究生	农业机械化工程	甘蔗生产信息系统及智能装备	华南农业大学	
武涛	男		教授	无	博士研究生	农业机械化工程	甘蔗生产信息系统及智能装备	华南农业大学	
吴伟斌	男		教授	无	博士研究生	农业机械化工程	山地智能作业装备	华南农业大学	
张明华	男		副教授	无	博士研究生	农业机械化工程	智能化种植装备	华南农业大学	

黄培奎	男		高级工程师	无	博士研究生	农业电气化与自动化	农业机械智能导航及自动作业	华南农业大学	
赵润茂	男		副教授	无	博士研究生	农业机械化	农田土壤信息智能感知及决策	华南农业大学	

2.2. 广东省无人化智慧农场工程技术研究中心

广东省科学技术厅

粤科函产字〔2025〕272号

广东省科学技术厅关于认定 2024 年度 广东省工程技术研究中心的通知

各地级以上市科技局，各有关单位：

根据《广东省工程技术研究中心管理办法》（粤科规范字〔2022〕12号）和《广东省科学技术厅关于组织申报 2024 年度广东省工程技术研究中心的通知》（粤科函产字〔2024〕1096号），经组织申报、专家评审和网上公示及复核，现认定广东省智慧能源技术与应用工程技术研究中心等 554 家单位为 2024 年度广东省工程技术研究中心（简称“工程中心”，名单见附件）。有关事项通知如下：

一、工程中心是构建以企业为主体、市场为导向、产学研用深度融合的技术创新体系的重要科研平台。各工程中心要加大科研投入和条件建设，加强技术攻关和协同合作，加速成果转化和人才培养，在推进现代化产业体系建设、促进产业科技互促双强中发挥支撑作用。

二、鼓励各地市科技管理部门积极研究并制定配套支持政

策，指导和服务工程中心进一步提高自主创新能力，推动工程中心高质量发展。

三、工程中心实行网络化管理，相关信息发布及过程管理依托“广东省工程技术研究中心创新服务平台”（www.gdetrc.net）实施，请2024年度认定通过的工程中心于2025年3月15日前登录该平台进行注册备案。后续工程中心如发生依托单位更名、所属地或工程中心主任变更及资格撤销等情况，请通过服务平台进行相关操作。

附件：2024年度广东省工程技术研究中心认定名单



公开方式：主动公开

- 2 -

序号	工程中心名称	依托单位	所在地市
118	广东省节能建筑工程质量检测工程技术研究中心	广东惠和工程检测有限公司	广州市
119	广东省公路数智化养护工程技术研究中心	广东和立交通养护科技有限公司	广州市
120	广东省智能认知与行为决策工程技术研究中心	华南理工大学	广州市
121	广东省集成电路设计自动化工程技术研究中心	广东工业大学	广州市
122	广东省无人系统群体智能应用工程技术研究中心	中山大学	广州市
123	广东省毫米波太赫兹器件与系统工程研究中心	广东大湾区空天信息研究院	广州市
124	广东省人工智能赋能智慧物流工程技术研究中心	暨南大学	广州市
125	广东省新型显示工程技术研究中心	广东聚华新型显示研究院	广州市
126	广东省空天飞行器工程技术研究中心	广东空天科技研究院（南沙）	广州市
127	广东省近海基础设施韧性提升工程技术研究中心	广州航海学院	广州市
128	广东省无人化智慧农场工程技术研究中心	华南农业大学	广州市
129	广东省聚集诱导发光工程技术研究中心	广东省大湾区华南理工大学聚集诱导发光高等研究院	广州市
130	广东省智慧设施农业工程技术研究中心	广东省农业科学院设施农业研究所	广州市
131	广东省未来植源性化妆品创制工程技术研究中心	中新国际联合研究院	广州市
132	广东省粤北地方家畜健康养殖工程技术研究中心	广东科贸职业学院	广州市
133	广东省高性能纸用功能材料工程技术研究中心	广东轻工职业技术大学	广州市

第 8 页，共 33 页

姓名	性别	年龄	职称	职务	学历	现从事专业	在中心承担的任务	所在单位	签名
罗锡文	男		院士	主任	硕士研究生	农业机械 化工程	主持工程中心 的建设	华南农 业大学	
中心主要研究人员									
姓名	性别	年龄	职称	职务	学历	现从事专业	在中心承担的任务	所在单位	签名
胡炼	男		教授	副主任	博士研究生	农业电气 化与自动 化	无人农场管 控平台首席 科学家	华南农 业大学	
何杰	男		副教授	副主任	博士研究生	农业电气 化与自动 化	水稻无人农 机技术与装 备首席专家	华南农 业大学	
李君	男		教授	院长	博士研究生	车辆工程	果园信息系 统与智能装 备首席专家	华南农 业大学	
周志艳	男		教授	无	博士研究生	农业生物 环境与能 源工程	农业航空关 键技术与装 备首席专家	华南农 业大学	
黄培奎	男	34	高级工 程师	无	博士研 究生	农业电气 化与自动 化	农业机械智 能导航及自 动作业	华南农 业大学	
赵润茂	男	33	副教授	无	博士研 究生	农业机械 化	农田土壤信 息智能感知 及决策	华南农 业大学	

2.3. 农业农村部水田农业机械装备重点实验室

农业部文件

农科教发〔2011〕8号

农业部关于公布农业部重点实验室及 农业科学观测实验站名单的通知

各有关单位：

根据《农业部重点实验室发展规划(2010-2015年)》(农科教发〔2010〕4号)和《农业部重点实验室管理办法》(农科教发〔2010〕5号),2010年和2011年我部分两批组织开展了农业部重点实验室体系的布局和遴选工作。经过申报、评审和公示综合性重点实验室、发布专业性(区域性)重点实验室和农业科学观测实验站建设指南、综合性重点实验室编制建设方案、专家组论证建设方案以及总体平衡等工作环节,确定了由33个综合性重点实验室、183个专业性(区域性)重点实验室和251个农业科学观测实

— 1 —

度有的已经出台,有的即将制定,其根本目的在于促进形成“布局合理、任务明确、协作紧密、运转高效”的重点实验室体系。各有关单位要积极探索,不断创造行之有效的管理和运行机制,进一步完善纵横连通机制、学术交流机制、人员互动机制和考核激励机制,稳步推进农业部重点实验室建设工作,务求取得实效,为农业科技进步和发展现代农业做出应有的贡献。

— 4 —

附件:农业部重点实验室及农业科学观测实验站名单



28 现代农业装备学科群			
类别	序号	名称	依托单位
综合性重点实验室	1	农业部现代农业装备重点实验室	农业部南京农业机械化研究所
专业性/区域性重点实验室	1	农业部旱地农业装备技术重点实验室	黑龙江省农业机械工程科学研究院
	2	农业部水田农业装备技术重点实验室	华南农业大学
	3	农业部丘陵山地农业装备技术重点实验室	四川省农业机械研究设计院
	4	农业部草原畜牧业装备技术重点实验室	中国农业机械化科学研究院呼和浩特分院
	5	农业部渔业装备与工程技术重点实验室	中国水产科学院渔业机械仪器研究所
	6	农业部土壤-机器-植物系统技术重点实验室	中国农业大学
农业科学观测实验站	1	农业部草原畜牧业装备科学观测实验站	中国农业科学院草原研究所
	2	农业部林果棉装备科学观测实验站	新疆农业科学院农业机械化研究所
	3	农业部农机制造工艺科学观测实验站	福田雷沃国际重工股份有限公司
	4	农业部北方农业装备科学观测实验站	西北农林科技大学
	5	农业部南方农业装备科学观测实验站	安徽农业大学

姓名	性别	年龄	职称	职务	学历	现从事专业	在中心承担的任务	所在单位	签名
罗锡文	男	44	院士	主任	硕士研究生	农业机械化工程	主持工程中心的建设	华南农业大学	

中心主要研究人员

姓名	性别	年龄	职称	职务	学历	现从事专业	在中心承担的任务	所在单位	签名
胡炼	男	44	教授	副主任	博士研究生	农业电气化与自动化	无人农场管控平台首席科学家	华南农业大学	
何杰	男	44	副教授	副主任	博士研究生	农业电气化与自动化	水稻无人农机技术与装备首席专家	华南农业大学	
李君	男	44	教授	院长	博士研究生	车辆工程	果园信息化系统与智能装备首席专家	华南农业大学	
周志艳	男	44	教授	无	博士研究生	农业生物环境与能源工程	农业航空关键技术与装备首席专家	华南农业大学	
肖德琴	女	44	教授	无	博士研究生	农业电气化与自动化	家禽智慧农场关键技术与装备首席专家	华南农业大学	
汪沛	女	44	副教授	无	博士研究生	农业电气化与自动化	无人农场管控平台	华南农业大学	
张智刚	男	44	副教授	无	博士研究生	农业机械化工程	农业机械智能导航及自动作业	华南农业大学	
臧英	女	44	教授	副主任	博士研究生	农业机械化工程	农情信息感知及精准管控	华南农业大学	

黄培奎	男		高级工程师	无	博士研究生	农业电气化与自动化	农业机械智能导航及自动作业	华南农业大学	
-----	---	--	-------	---	-------	-----------	---------------	--------	--

1.1. 第十届国际大学生智能农业装备创新大赛一等奖



1.2.RoboMaster 2025 机甲大师超级对抗赛·全国赛一等奖



1.3.RoboMaster 2025 机甲大师超级对抗赛·区域赛一等奖



华南农业大学 Taurus 战队

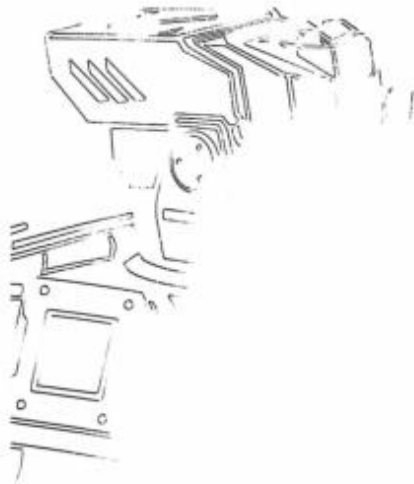
黄培奎 老师

您指导的队伍在“第二十四届全国大学生机器人大赛
RoboMaster 2025 机甲大师超级对抗赛·区域赛(南部赛区)”
中,荣获

一等奖

特发此状,以资鼓励。

指导单位:中国高等教育学会
中国工程院战略咨询中心



证书编号: RMUC2025QCOUM13799E

2.1. 中国精品科技期刊顶尖学术论文领跑者 5000



2.2.WFP 感谢信



United Nations World Food Programme
联合国世界粮食计划署

SAVING LIVES
CHANGING LIVES
拯救生命
改善生计

24 June 2025
CHA_160_ORG 200

Dr. Huang Peikui
Senior Engineer
School of Engineering, South China Agricultural University
No. 483 Wushan Road, Tianhe District, Guangzhou, 510642

Dear Dr. Huang,

I would like to express my appreciation for the strong support provided by you to the Western African delegation that visited unmanned farm of South China Agricultural University on June 20, 2025.

The unmanned farm tour you guided and the presentation you delivered, has provided the African delegates with deep understanding of the advanced rice value chain development in China, especially on how digital technologies boost agricultural productivities. This valuable learning opportunity allowed the delegates to witness firsthand the achievements and best practices of the rice sector in Guangdong. We anticipate that the knowledge gained, along with the insights shared by your experts, will empower the delegates with innovative strategies and sustainable practices. These can be implemented to enhance productivity, improve quality and contribute to food security in Western Africa.

Once again, I want to express my sincere gratitude for your support to WFP and ongoing dedication to the technical assistance and knowledge sharing with global south countries.

Sincerely yours,


Zhao Bing
Representative Director
WFP China Office

A red circular stamp with the text "UN WORLD FOOD PROGRAMME" around the top edge and "联合国世界粮食计划署中国办公室" around the bottom edge. In the center is a stylized globe with a grain stalk.

2.3. 第二十五届“广东青年五四奖章集体”



2.4. 中国产学研百佳科技创新团队



2.5. 中国农业重大科技新成果



2.6. 第七届中国科协优秀科技论文遴选计划优秀论文

