

基于双前馈-改进串级PID的设施蔬菜表型信息采集稳衡云台设计与试验

于海业 张楠 潘智浩 付含冰 张晨曦 姜然哲 张蕾
(吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130012)

摘要: 针对设施蔬菜表型信息采集过程中,由于地形不平整产生 3~6 Hz 振动造成采集装置出现高频小角度倾斜、动态响应滞后,进而导致采集图像分辨率下降等问题,设计了基于重力补偿角加速度双前馈-改进串级 PID 复合控制系统的适用设施表型采集装置的稳衡云台。硬件上,针对 30 cm 窄行距与多源传感器搭载需求,设计 300 mm × 280 mm × 250 mm 单臂稳衡云台,整机仅 5 kg,最大负载能力达 15 kg。集成 X-Y-Z 轴重心滑轨,将负载重心偏差控制在 ±5 mm,由此引起的重力矩波动小于 0.5 N·m。控制策略上,通过线性拟合构建重力补偿前馈模型($R^2 = 0.9912$),以抵消重力矩干扰。提出内环速度环叠加外环位置环的改进串级 PID,引入积分分离、积分限幅及误差过零复位机制,解决传统 PID 小角度调整积分饱和问题,稳态误差控制在 0.1°以内。融合载体与云台双 IMU 角加速度前馈,抵消采集车 2~3 m/s² 启停/转向带来的惯性扰动。运行效果验证试验表明,复合控制使系统阶跃响应时间缩短 80% 且全程无超调。采集车以 0.5 m/s 行驶时,云台三轴角度围绕目标值小幅度振荡,其中横滚轴角度 ±0.5°、俯仰轴角度 ±0.3°、航向轴角度 ±0.2°,满足设施蔬菜表型采集对姿态稳定性的要求。

关键词: 设施蔬菜; 表型信息; 稳衡云台; 双前馈; 串级 PID

中图分类号: 223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)01-0030-11 OSID: 

Design and Experiment of Stabilized Platform for Vegetable Phenotype Acquisition Based on Double Feedforward – Improved Cascade PID in Greenhouse

YU Haiye ZHANG Nan PAN Zhihao FU Hanbing ZHANG Chenxi JIANG Ranzhe ZHANG Lei
(College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: In greenhouse vegetable phenotyping, uneven terrain induces high-frequency vibrations in the 3~6 Hz range, leading to small-angle vibration and hysteresis in the acquisition device, which degraded the resolution of collected images. A stabilized platform was developed based on a composite control system incorporating gravity-compensated dual angular acceleration feedforward and an improved cascade PID controller. A single-arm stabilized platform with dimensions of 300 mm × 280 mm × 250 mm was constructed to accommodate a narrow line spacing of 30 cm and support the integration of multi-source sensors. The stabilized platform had a self-weight of 5 kg and can carry a payload of 15 kg. It was equipped with X-Y-Z axis sliding rails for center-of-gravity adjustment, limiting the center-of-gravity deviation to within ±5 mm and maintaining gravitational torque variation below 0.5 N·m. A gravity compensation feedforward model was established by linear fitting, achieving a determination coefficient R^2 of 0.9912. An improved cascade PID structure was implemented, combining an inner velocity loop with an outer position loop. Key enhancements included integral separation activated when the error exceeded 1°, integral limiting, and a resetting mechanism triggered by error zero-crossing. These measures effectively suppressed integral saturation during fine adjustments, achieved a steady-state error of 0.1°. In addition, angular acceleration feedforward from dual IMUs mounted on both the vehicle and the stabilized platform compensated for inertial disturbances caused by vehicle start-stop and turning accelerations of 2~3 m/s². The verification test results showed that the composite control strategy

收稿日期: 2025-09-30 修回日期: 2025-10-20
基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2002305-2)
作者简介: 于海业(1963—),男,教授,博士,主要从事农业生物环境与能源工程研究,E-mail: haiye@jlu.edu.cn
通信作者: 张蕾(1979—),女,教授,博士,主要从事农业生物环境与能源工程研究,E-mail: z_lei@jlu.edu.cn

reduced the system step response time by 80% without overshoot. When the vehicle operated at 0.5 m/s, the stabilized platform's triaxial angular oscillation was constrained to $\pm 0.5^\circ$ in roll, $\pm 0.3^\circ$ in pitch, and $\pm 0.2^\circ$ in yaw. These outcomes confirmed that the system satisfied the requirements for high-accuracy phenotyping acquisition.

Key words: greenhouse vegetable; phenotypic information; stabilized platform; double feedforward; cascade PID

0 引言

植物表型信息作为反映植物生长状态、生理特性与环境适应性的核心数据^[1-2],其快速精准采集是推动作物育种效率提升^[3]、智慧农业精准管理及植物科学基础研究的关键支撑^[4]。随着全球粮食安全需求的加剧^[5]与农业数字化转型加速^[6],传统依赖人工测量的表型采集方式因效率低、主观性强、破坏性大等局限,已难以满足规模化育种与动态监测需求^[7]。设施蔬菜栽培作为设施农业集约化种植的典型作物,其叶面积、叶绿素含量、株高等表型参数的高精度采集,是育种筛选与栽培优化的核心支撑^[8]。

在作物表型分析领域,现有的代表性机器人平台,如 TerraSentia^[9]搭载激光雷达与 RGB 摄像机以及 HTP 表型机器人^[10]依赖双目相机,均存在一定的局限性,受结构限制,其负载能力通常仅为 8 ~ 10 kg,难以搭载多源传感器,且存在重心不可调、刚性连接难缓冲扰动、拍摄方向固定等缺陷,制约数据采集稳定性^[11-12]。国内研究团队,唐政等^[13]开发的田间无人车,邱小雷等^[14]研制的巡检机器人,虽致力于多传感器集成,但仍未有效解决温室特定场景下的核心挑战。当前,移动表型采集装置在温室环境中面临的主要技术难点在于:地形不平整引入的 3 ~ 6 Hz 低频微扰动,导致云台产生高频小角度倾斜与动态响应滞后,从而增加了表型数据失真的风险^[15]。

在无人机、机载与航拍等领域的云台控制研究中,多种控制策略已被广泛探索。UMENO 等^[16]率先将 DOB 引入机载云台控制,李嘉全等^[17]在此基础上进行了结构优化,谢巍等^[18]则通过增设控制器提升了系统的抗噪鲁棒性。然而,无人机云台系统的非线性和强耦合特性限制了单一 DOB 的控制效果,这促使研究者转向智能控制方法。高嵩等^[19]开发的变论域模糊控制器和朱海荣等^[20]提出的单神经元自适应 PID 策略,分别从不同角度提升了系统的自适应能力和抗扰性能。在控制结构创新方面,HERVÉ^[21]的机械解耦二自由度机构为多轴控制提供了新思路。随着控制需求的不断提升,先进复合控制策略成为发展趋势:仇笑天^[22]采用的模糊自整

定 PID 有效解决了非线性系统的控制难题。GHASEMI 等^[23]的模糊调谐 PID 和 CUI 等^[24]的多频段扰动观测器进一步增强了系统的动态性能。GHEISRNEJAD 等^[25]的模糊 PID 混合补偿、李军等^[26]的数据驱动 PID 和李泽楷等^[27]的前馈-PID 复合控制,标志着云台控制正从传统模型依赖向数据驱动与模型结合的新范式转变。

基于上述研究现状与分析,本文面向设施农业实际作业场景,旨在解决温室窄行距下云台的高负载、重心自适应以及多源扰动抑制问题,设计一种基于重力补偿角加速度双前馈-改进串级 PID 的稳衡云台。本文设计稳衡云台的机械结构,从控制系统层面为应对地形振动、重力矩与惯性扰动等多源干扰的协同抑制提供理论依据与技术途径,为提高设施内表型装置图像采集的精度与稳定性提供技术支撑。

1 稳衡云台结构与功能

1.1 核心结构

稳衡云台作为高负载重心可调表型移动采集车的核心执行部件,集成了高负载-重心调节-可变拍摄方向三重功能,表型移动采集车结构如图 1a 所示,稳衡云台结构如图 1b 所示,采用单臂框架结构,整体尺寸为 300 mm × 280 mm × 250 mm,最大负载承载能力达 15 kg,可同时集成多光谱相机、热成像仪及数据存储模块。与传统云台普遍 8 ~ 10 kg 的负载上限相比,本设计有效解决多源传感器同时搭载导致结构变形与姿态控制失效问题。云台材料选用 Aluminum Alloy 6061,其密度为 2 700 kg/m³,弹性模量为 68.0 GPa,屈服强度为 276 MPa,在实现 15 kg 高负载的同时,将框架自身质量控制在 5 kg 以内,减少因结构过重导致采集车行驶时的额外惯性扰动。此外,不同于传统双臂对称框架占用横向空间大,单臂设计可将横向宽度压缩至 300 mm 以内,解决了传统云台宽度过大无法沿作物窄行行驶的空间适配问题。

1.2 重心调节机构

现有云台多采用固定结构设计,当更换传感器组合时,负载重心易出现偏移,引发重力矩干扰,该干扰迫使云台控制系统需持续输出额外力矩进行抵

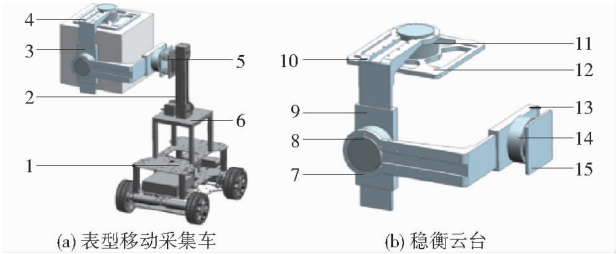


图1 装置结构图

Fig.1 Device structure diagrams

1.行走车 2.同步带机构 3.多源传感器 4.稳衡云台 5.隔振装置 6.橡胶衍生支撑底座 7.横滚轴横臂 8.俯仰轴电机 9.Z轴重心调节滑轨 10.俯仰轴纵臂 11.航向轴电机 12.传感器连接板 13.X轴重心调节滑轨 14.横滚轴电机 15.稳衡云台连接板

消,最终产生稳态误差,影响表型参数测量精度。稳衡云台重心调节前状态如图 2a 所示,此时多源传感器质心 A 与横滚轴电机输出轴轴心 B 距离为 d_1 ,电机输出力矩 Fd_1 较大,长时间高负载工作将缩短电机使用寿命,为解决这一问题,稳衡云台设计三轴重心调节滑轨: X 轴行程 $\pm 50\text{ mm}$ 、 Y 轴行程 $\pm 20\text{ mm}$ 、 Z 轴行程 $\pm 50\text{ mm}$,微调后状态如图 2b 所示,可将负载重心偏差 d_2 控制在 $\pm 5\text{ mm}$, $\pm 5\text{ mm}$ 的重心偏差对应的重力矩波动小于 $0.5\text{ N}\cdot\text{m}$,仅为传统固定结构重心偏差对应的 $1/3$ 。 X 轴调节应对传感器左右安装偏移, Y 轴调节应对前后重心偏差, Z 轴调节应对高度方向重心偏移,该多维度、有针对性地调节设计,区别于传统云台仅单轴调节的局限,可覆盖多源传感器集成的所有重心偏移场景。手动微调无需拆卸传感器即可调整重心,单次调节时间小于 1 min ,解决传统云台调整重心需重新拆装传感器、耗时且易损伤设备的问题,提升田间作业效率。

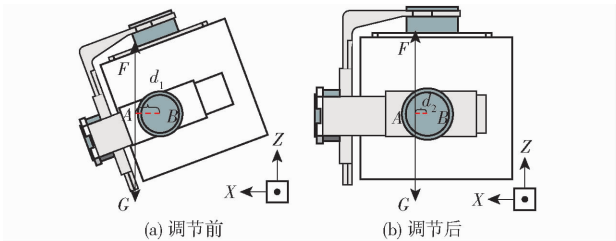


图2 重心调节示意图

Fig.2 Schematics of center of gravity adjustment

1.3 可变拍摄方向功能

稳衡云台俯拍视角如图 3a 所示,侧拍视角如图 3b 所示。

该云台系统具备可变拍摄角度调节能力,其角度控制通过双轴电机协同实现:其中,横滚 (Roll) 轴电机承担拍摄视角倾斜方向的调节功能,通过电机转动可灵活切换俯拍、侧拍等不同拍摄姿态,其机械调节范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$,能够覆盖水平至垂直方向的倾斜角度需求。俯仰轴 (Pitch) 轴电机则负责针对

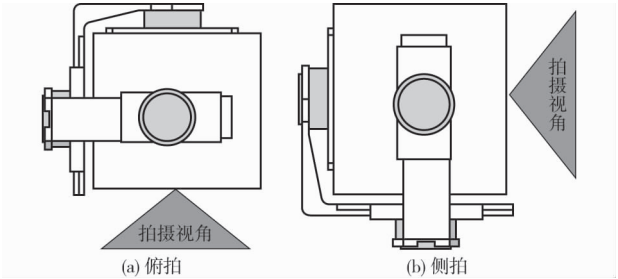


图3 稳衡云台拍摄视角示意图

Fig.3 Schematics of stabilized platform shooting angle

拍摄目标前排与后排的角度差异进行调节,通过电机驱动实现拍摄视角在前后方向的俯仰变化,该轴调节范围同样为 $0^\circ \sim 180^\circ$,可满足对不同排次目标的精准取景需求,通过双轴联动实现了对作物冠层多方位、多角度的无损观测覆盖。

1.4 结构静力学分析

利用 ANSYS 软件 Static Structural 分析云台结构受力情况,材料选用 Aluminum Alloy 6061,材料参数为:密度 $2\,700\text{ kg/m}^3$,弹性模量 68.0 GPa ,泊松比 0.33 ,屈服强度 276 MPa 。静态压力施加在多源传感器连接板上方,方向竖直向下,力为 150 N 。结果如图 4 所示,显示最大形变在多源传感器连接板的右上端,最大变形量为 0.776 mm ,小于 2 mm ,传感器安装位置的微小形变小于 1.5 mm ,可确保镜头光轴偏移量小于 0.1° ,避免因结构形变导致图像分辨率下降,如叶片边缘模糊。

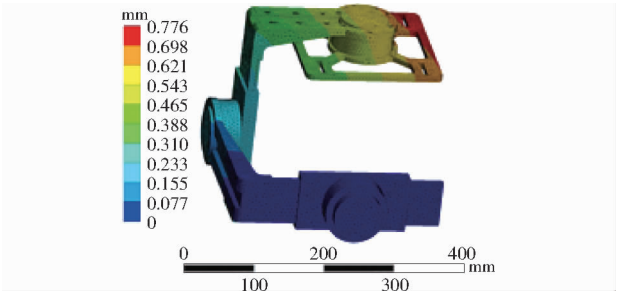


图4 ANSYS 静力学分析变形云图

Fig.4 Deformation from ANSYS static analysis

如图 5 所示,Aluminum Alloy 6061 的屈服强度 276 MPa ,远高于 150 N 负载下的实际应力 30 MPa ,

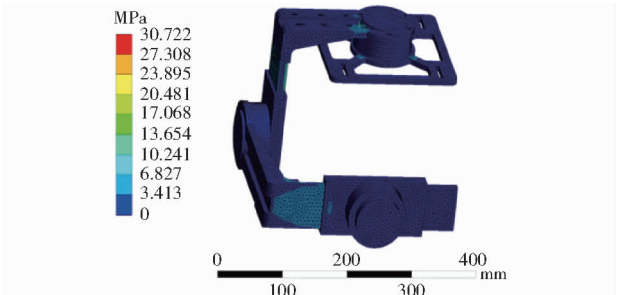


图5 ANSYS 静力学分析等效应力云图

Fig.5 Equivalent stress from ANSYS static analysis

确保云台在设施内长期作业,每天 8 h、连续 100 d 后无塑性变形,解决传统云台长期使用后结构精度下降的问题。

1.5 结构动力学分析

通过模态分析评估车体运动时周期性振动载荷的影响。根据受迫振动原理,振动载荷会通过车体传递到云台上,当传递的振动频率与云台自身固有频率相同时,会产生共振现象。通过对云台结构进行模态分析,分析云台结构固有频率和振型,避免与

车体振动频率产生共振现象。

考虑到工作环境中云台结构通过横滚轴电机固定在车体上方,因此对云台结构进行约束模态分析,并在电机固定处添加固定约束。对云台结构前 10 阶模态进行求解,并分析前 6 阶模态结果,稳衡云台模态分析结果如图 6 所示。稳衡云台的一阶固有频率为 51.828 Hz,远高于设施地面引发的 3 ~ 6 Hz 主要激励频率,从机理上避免了作业环境下的共振风险,证明了结构设计的合理性。

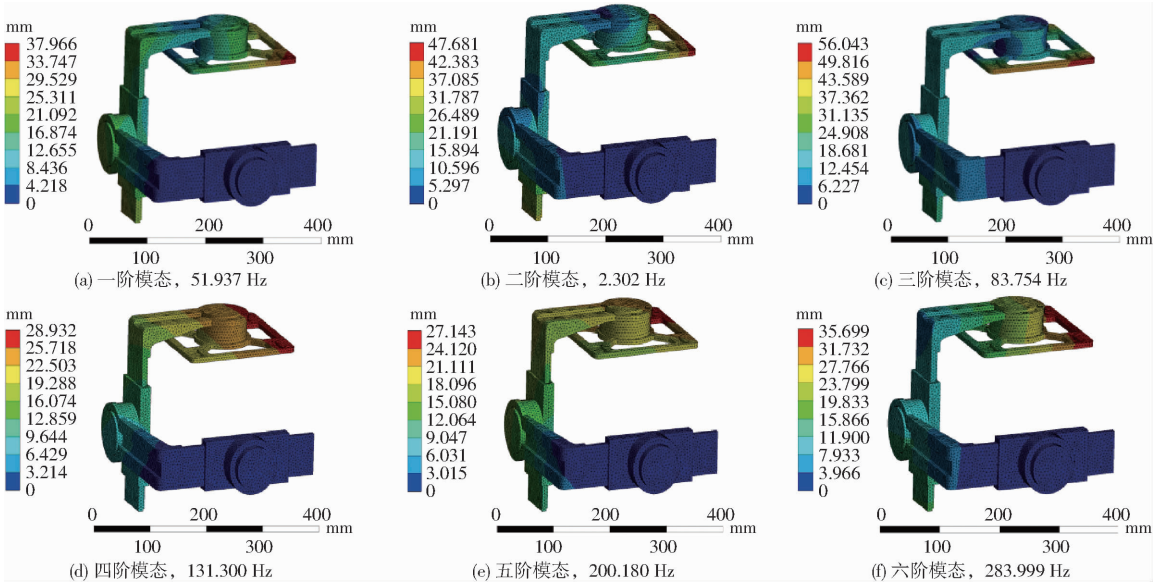


图 6 稳衡云台模态分析云图

Fig. 6 Modal analysis of stabilized platform

为进一步评估稳衡云台在动态工况下的结构性能,开展了瞬态动力学分析。模拟工况设定如下:云台承载 15 kg 负载,在多源传感器连接板上方施加 150 N 竖直向下的集中载荷,同时模拟采集车以 2.5 m/s² 加速度启动过程中的惯性载荷。在电机安装位置施加固定约束,设置最小时间步长为 0.05 s、最大步长为 0.1 s,总计算步数为 20 步,仿真时长为 1 s。

变形情况分析结果如图 7 所示:结构最大动态变形量为 1.758 mm,出现在多源传感器连接板边缘区域。该变形量较静力学分析结果(0.776 mm)有

所增大,符合动态载荷下惯性效应引起的响应特征,但仍低于 2 mm 的设计许可阈值,表明结构动态刚度满足高精度姿态控制的要求。

等效应力分析结果如图 8 所示。结构最大动态应力为 35 MPa,位于横滚轴电机与连接板装配区域,属于典型的应力集中部位。该应力远低于所选材料 Aluminum Alloy 6061 的屈服强度,动态工况下安全系数达 7.9,表明云台在加速惯性载荷作用下具有充分的强度储备,无塑性变形或结构失效风险,能够保障在设施农业环境中长期可靠运行。

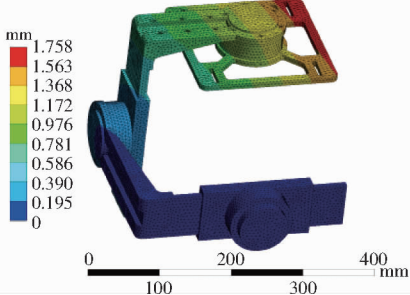


图 7 ANSYS 瞬态结构分析变形云图

Fig. 7 Deformation from ANSYS transient structural analysis

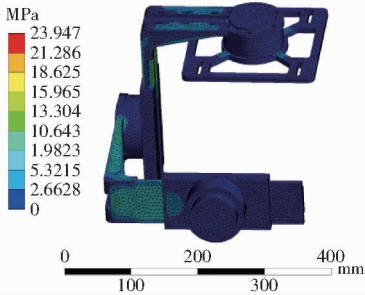


图 8 ANSYS 瞬态结构分析等效应力云图

Fig. 8 Equivalent stress from ANSYS transient structural analysis

2 稳衡云台控制策略

2.1 闭环控制逻辑构建

稳衡云台控制策略如图 9 所示,对于双前馈-改进串级 PID 复合控制,针对多源干扰实施分层抑制,为消除重力干扰,将横滚轴简化为均质刚体臂建模,推导力矩公式以实现重力前馈补偿。为改善 PID 超调与动态稳定性问题,采用内环速度环+外环位置环串级结构,结合积分分离/限幅改进,依据 PID 控制律整定参数。为补偿加速度扰动引起的滞后,通过双 IMU 融合,转换加速度坐标系后依据牛顿-欧拉方程计算补偿力矩,前馈叠加至电机控制量以抵消惯性干扰。

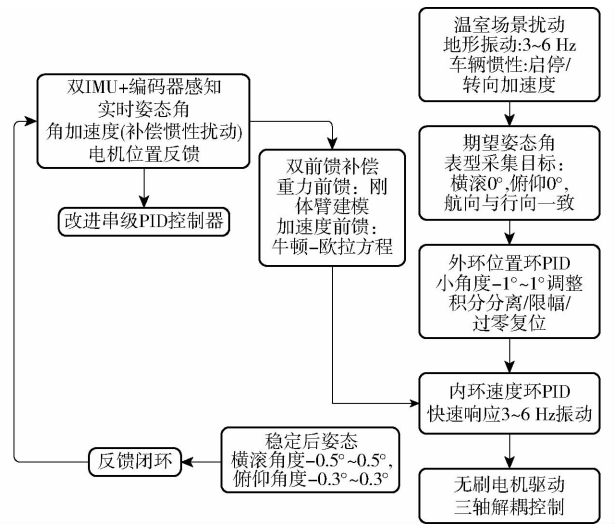


图 9 闭环控制流程图

Fig. 9 Closed-loop control flowchart

2.2 重力扰动前馈补偿建模

重力扰动是影响稳衡云台控制系统稳定性的主要因素之一^[28]。在某些情况下,特别是当云台处于临界稳定状态或受到外部扰动时,重力引起的不确定性可能会导致系统出现振荡甚至失稳。

通过实施重力前馈补偿,可预先抵消重力扰动对系统稳定性的影响。针对均质负载中,系统模型较为明确,以横滚轴为例,可采用力学分析法计算重力所产生的干扰力矩。横滚轴旋转前受力分析如图 10a 所示,横滚轴旋转后受力分析如图 10b 所示。

以稳衡云台的横滚轴臂为研究对象,将其简化

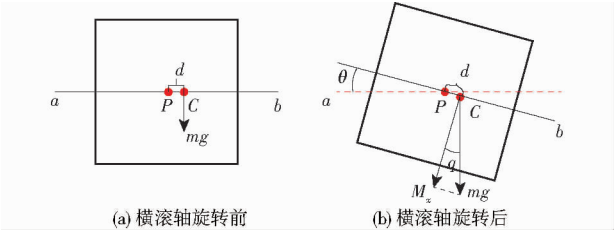


图 10 横滚轴旋转受力分析

Fig. 10 Roll axis rotation model

为均质刚体臂,当横滚轴臂绕 a 轴旋转 θ 时,臂的姿态由 θ 唯一确定, $\theta = 0^\circ$ 为水平初始位置, $\theta > 0^\circ$ 表示臂向上旋转, $\theta < 0^\circ$ 表示向下旋转。此时,臂的重心 C 相对于旋转中心 P 的位置向量为

$$\boldsymbol{r} = (0, d\cos\theta, d\sin\theta)$$
 (1)

式中 d ——重心到旋转中心的距离

横滚轴臂重力对横滚轴的干扰力矩源于重力 F_g 对旋转中心 P 的力矩。重力向量为

$$\boldsymbol{F}_g = (0, 0, -mg)$$
 (2)

根据力矩的定义^[29]

$$\boldsymbol{M} = \boldsymbol{r} \times \boldsymbol{F}_g = \begin{vmatrix} \boldsymbol{i} & \boldsymbol{j} & \boldsymbol{k} \\ 0 & d\cos\theta & d\sin\theta \\ 0 & 0 & -mg \end{vmatrix}$$
 (3)

式中 $\boldsymbol{i}$ ——沿 x 坐标正方向的单位向量

$\boldsymbol{j}$ ——沿 y 坐标正方向的单位向量

$\boldsymbol{k}$ ——沿 z 坐标正方向的单位向量

化简后得仅 x 轴方向的力矩分量非零,即

$$M_x = -mgd\cos\theta$$
 (4)

式中 g ——重力加速度

2.3 串级 PID 反馈控制设计

该结构通过外环位置环规划全局运动轨迹,内环速度环快速抑制惯性扰动。参数整定需优先优化内环速度控制器带宽,再调节外环位置增益以平衡跟踪精度与超调。其控制框图如图 11 所示。

PID(比例-积分-微分)连续域控制律及其数字控制系统离散化形式分别为^[30]

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$
 (5)

式中 K_p ——比例系数

K_i ——积分系数

K_d ——微分系数

$$u(k) = K_p e(k) + K_i T_s \sum_{i=0}^k e(i) + K_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T_s}$$
 (6)

式中 T_s ——采样周期

$e(k)$ ——第 k 次采样的误差

为保障云台控制效果,通过试验分别对速度环、位置环的 K_p 、 K_i 、 K_d 进行了参数整定,并通过多组工况下的参数适配与实时反馈调节实现装置移动过程中的姿态稳定,以及表型采集镜头对作物目标的精准追踪,由此进一步提升图像采集的清晰度与数据一致性。

2.4 加速度前馈策略制定

为克服传统反馈控制策略在应对高频、大幅值载体加速度扰动时存在的显著局限性问题,设计了基于双 IMU 数据融合的加速度前馈补偿方案,通过

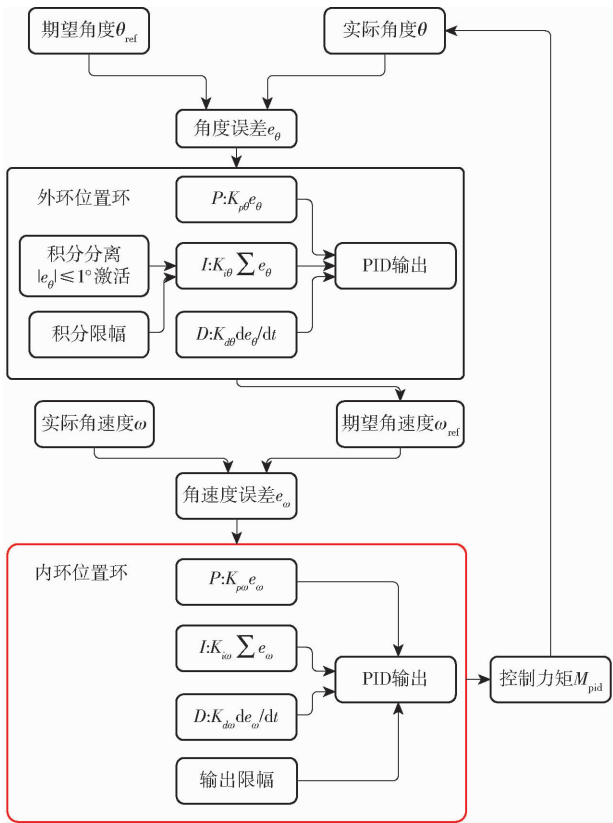


图 11 串级 PID 控制框图

Fig. 11 Block diagram of cascade PID control

主动抵消载体运动引起的惯性干扰力矩,提升云台系统的动态响应性能与抗扰动能力。

若不对此类惯性力矩进行前馈补偿,仅依赖反馈控制,控制系统需通过误差积分生成反向力矩以平衡扰动^[31]。这一过程引入的相位滞后将显著降低系统带宽,且在高动态场景下,反馈控制器可能因响应速度不足导致云台失稳。

在载体与云台分别部署 IMU,实现扰动加速度的分离测量与融合处理,首先对载体加速度进行坐标系转换,载体 IMU 测量得到的加速度 a_B 需转换至云台坐标系 G ,以计算其对云台关节实际影响,即

$$a_G = R_B^G \cdot a_B + \omega_B \times (\omega_B \times d) + \dot{\omega}_B \times d \quad (7)$$

式中 R_B^G ——从载体坐标系到云台坐标系的旋转矩阵

ω_B ——载体角速度

R_B^G 由云台 IMU 测量的相对姿态角实时更新,而后根据牛顿-欧拉方程^[31],云台关节需补偿的惯性力矩为

$$\tau_{feedforward} = m\mathbf{r} \times \mathbf{a}_G + \mathbf{J} \times \dot{\omega}_B \quad (8)$$

式中 $\mathbf{r}$ ——载体重心相对于云台旋转中心的偏移向量

$\mathbf{J}$ ——转动惯量矩阵

该补偿力矩通过前馈通道直接叠加至电机控制量^[32],即

$$\tau_{cmd} = \tau_{feedback} + K_f \tau_{feedforward} \quad (9)$$

式中 $\tau_{feedback}$ ——PID 反馈控制器输出

K_f ——前馈增益系数,用于调节补偿强度

τ_{cmd} ——电机控制量

3 稳衡云台算法验证与性能试验

3.1 重力补偿前馈模型构建与精度验证

对于由多源传感器构成的非均质负载,其重心无法被完全精确地调节至旋转中心,因而产生 $\pm 5 \text{ mm}$ 以内的残余重心偏差。此偏差是引发时变重力矩干扰、影响云台姿态稳定的根本物理成因。

在理论设计中,重力补偿前馈控制通常基于精确的系统动力学模型,通过建立负载质量、重心位置与姿态角的解析关系实现干扰力矩的预补偿。采用试验方法构建补偿模型是更为可行的途径。具体实施过程如下:首先,在横滚轴臂的全工作范围内选取离散姿态角采样点,在每个采样点处通过伺服控制器向执行机构施加可控力矩,并调整力矩大小直至机构处于静止平衡状态,此时记录的力矩即为该姿态角下抵消重力干扰所需的补偿力矩。随后,基于采集的离散数据对 (θ, M_{comp}, i) ,采用最小二乘曲线拟合方法构建补偿力矩与姿态角函数关系 $M_{comp}(\theta)$ 。考虑到重力力矩的物理特性,通常选择包含三角函数或多项式的拟合函数。

为确定重力补偿前馈模型关键参数,并验证其对温室作业场景下抵消重力矩干扰的有效性,于吉林大学南岭校区农机实验室($44^\circ 50' \text{N}$, $125^\circ 18' \text{E}$)内开展试验:采用伺服控制器(无刷伺服电机)、高精度姿态传感器、力矩采集模块与本研究设计的稳衡云台共同搭建测试系统,如图 12 所示。

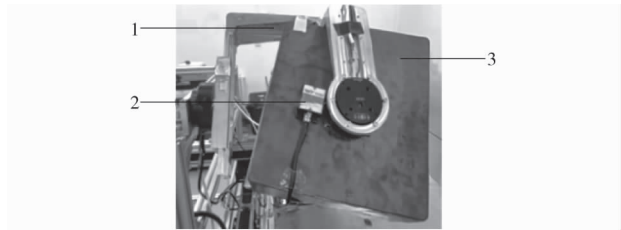


图 12 重力补偿前馈测试系统实物图

Fig. 12 Physical diagram of gravity compensation feedforward test system

1. 伺服控制器 2. 高精度姿态传感器 3. 稳衡云台

将横滚轴姿态角调节范围设定为 $-90^\circ \sim 90^\circ$,按 5° 间隔划分离散采样点,在每个采样点处,通过伺服控制器向横滚轴执行机构施加可控力矩,实时监测姿态角变化,逐步微调力矩值直至横滚轴处于静止平衡状态,记录该状态下的补偿力矩 M_{comp} 与对应姿态角 θ 。重复 3 次相同采样点的测试以减少机

械摩擦、传感器误差等随机干扰,取 3 次测试数据的平均值作为该姿态角下的最终试验数据,经基于余弦函数的线性拟合,得到正转补偿力矩的拟合函数如图 13 所示。

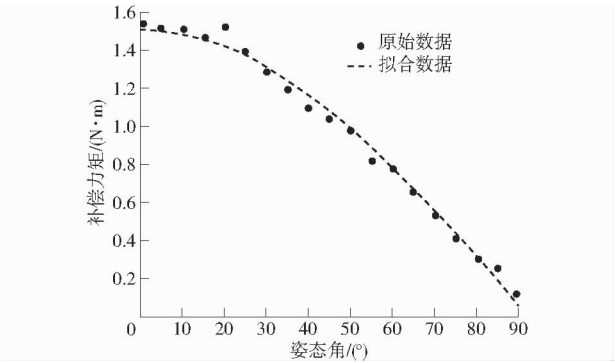


图 13 正转补偿力矩拟合曲线

Fig. 13 Fitting curve of forward rotation compensation torque

基于试验测得的云台补偿力矩与姿态角数据,采用最小二乘法对重力干扰力矩模型进行参数辨识。通过建立线性补偿模型

$$M_{comp} = k \cos \theta + b \tag{10}$$

式中 k ——比例系数

b ——常数项

拟合得到拟合函数

$$M_{comp} = 1.454 \cos \theta + 0.054 \tag{11}$$

计算后 $R^2 = 0.9912$,表明该模型可解释大部分的力矩变化,具有高度线性相关性,最大绝对误差为 $0.035 \text{ N} \cdot \text{m}$,均方根误差为 $0.044 \text{ N} \cdot \text{m}$,标准差为 $0.045 \text{ N} \cdot \text{m}$,验证了模型无系统性偏差且离散程度可控,当 $\theta = 0^\circ$ 时模型预测值与实测值 $1.531 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的相对误差为 15.252% ,符合机械系统摩擦等未建模因素的预期影响范围。

3.2 改进串级 PID 稳态精度验证

在设施内窄行距 30 cm 约束下,采集车需频繁进行小幅度的航向修正以保持居中行驶。此动作导致云台持续接收到 $\pm 1^\circ$ 以内的高频、小角度姿态修正指令,传统 PID 在此工况下极易产生积分饱和,进而引发超调与持续振荡,影响图像采集的瞬时稳定性。

在本研究中无刷电机的串级 PID 控制采用内环为速度环、外环为位置环的架构,其核心思想是通过位置误差生成速度指令,再由速度控制环驱动电机实现精确运动跟踪。外环位置控制器以目标位置与编码器反馈位置的误差为输入,经位置 PID 运算输出角速度参考值^[32]

$$\omega_{ref}(k) = K_p(\theta) e_\theta(k) + K_i(\theta) T_s \sum_{i=0}^k e_\theta(i) + K_d(\theta) \frac{e_\theta(k) - e_\theta(k-1)}{T_s} \tag{12}$$

式中 $\omega_{ref}(k)$ ——角速度参考值
 $e_\theta(k)$ ——目标位置与编码器反馈位置误差
内环速度控制器则根据期望速度与实际速度的偏差,通过速度 PID 计算电机驱动电流,即

$$I_q(k) = K_p(\omega) e_\omega(k) + K_i(\omega) T_s \sum_{i=0}^k e_\omega(i) + K_d(\theta) \frac{e_\omega(k) - e_\omega(k-1)}{T_s} \tag{13}$$

式中 $I_q(k)$ ——电机驱动电流
 $e_\omega(k)$ ——期望角速度 ω_{ref} 与实际角速度 ω_{fb} 的偏差

改进后的积分分离 PID 算法引入二元切换函数 $\beta(e)$ ^[32]

$$\beta(e) = \begin{cases} 0 & (|e(t)| > \varepsilon) \\ 1 & (|e(t)| \leq \varepsilon) \end{cases} \tag{14}$$

式中 ε ——预设的积分激活阈值

修正后的控制律表达式为

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t \beta(t(\tau)) e(t) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \tag{15}$$

阈值 ε 的选取需权衡动态响应与稳态性能,本研究使用经验公式法取系统允许稳态误差 e_{ss} 的 $1.2 \sim 2.0$ 倍,即 ε 为 $(1.2 \sim 2.0) e_{ss}$ 。本研究允许的稳态误差范围取 0.5° ,则阈值 ε 取 1° 。当 $|e(t)| > 1^\circ$ 时,积分项被抑制,仅保留比例与微分作用,加速系统趋近目标值。当误差进入阈值范围后,积分项激活以逐步消除稳态偏差。在数字控制器中,该算法通过离散化实现:首先计算当前误差 $e(k) = r(k) - y(k)$,随后根据阈值判断积分项是否累积,更新积分项 $I(k) = I(k-1) + \beta(k) K_i T_s e(k)$,并结合微分项 $D(k) = K_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T_s}$ 生成控制量 $u(k)$ 。为增强抗饱和能力,进一步引入积分限幅与误差过零复位机制,避免残余累积与反向超调。改进后的阶跃试验结果如图 14 所示。结果表明,融合积分分离、积分复位以及 I 环的积分限幅改进算法能够有效抑制积分饱和现象,最终稳态误差在 0.1° 左右。

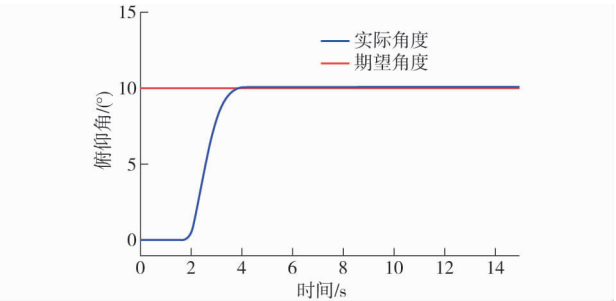


图 14 串级 PID 改进后的阶跃响应曲线

Fig. 14 Step response of the improved cascade PID controller

3.3 加速度前馈系统扰动抵消性能测试

设施不平整地面会引发 3 ~ 6 Hz 的随机振动,同时采集车的启停与转向加速度 $2 \sim 3 \text{ m/s}^2$ 会带来低频惯性扰动。这两种扰动在真实场景中耦合在一起,对云台稳定性构成严峻挑战。本试验旨在验证重力前馈-改进串级 PID-角加速度前馈的复合控制策略在此复杂工况下的综合性能。

在云台执行 20° 阶跃响应的过程中,使其在模拟设施不平整的地面上运动以引入随机振动,同时 在第 5 秒时向控制系统注入一个幅值为 2.5 m/s^2 的等效加速度阶跃信号,模拟采集车的紧急启停。通过对比单一反馈控制与前馈-反馈复合控制在此复合扰动下的性能,验证系统的综合抗干扰能力。

根据设计好的前馈-反馈控制系统,对具有重力矩影响的系统模型进行验证,其连续阶跃响应效果如图 15 所示。

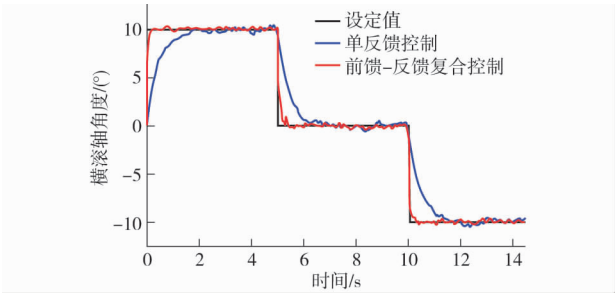


图 15 连续阶跃响应效果对比

Fig. 15 Comparison of continuous step response effects

通过理论分析与试验结果可知,在单反馈控制架构下,受重力矩干扰及系统动力学耦合效应影响,输出响应出现了约 1° 的超调现象。这是由于纯反馈控制机制依赖误差驱动,对重力等可测扰动的抑制存在滞后性,导致控制量调整不及时,从而引发暂态过程中的幅值过冲。与之形成对比的是,引入重力前馈补偿与角加速度前馈补偿的复合控制策略,通过构建包含扰动模型的前馈通道,实时生成与重力矩相抵消的补偿力矩,并对期望角加速度进行预瞄控制,有效降低了反馈通道的调节压力。结果表明,该复合控制策略使系统阶跃响应时间缩短 80%,且全程无明显超调,稳态误差控制在 0.5° 以内。这一差异本质上反映了前馈-反馈复合控制对可测扰动的前向抵消能力,以及对系统动态特性的主动补偿作用,证明其能够显著提升系统的动态响应速度、稳态精度及抗扰动性能。

4 云台稳衡效果试验

4.1 设施场景试验设计与装置搭建

试验于 2025 年 8 月 25 日在吉林大学南岭校区玻璃温室 ($43^\circ 51' \text{N}$, $125^\circ 20' \text{E}$) 内进行。为了在真实

场景中验证本文重力补偿角加速度双前馈-改进串级 PID 复合控制方法的有效性,搭建了用于试验测试的移动式表型采集装置,温室试验现场如图 16 所示。该装置主要由行走车、同步带传动机构、多源传感器、稳衡云台、隔振装置和橡胶衍生支撑底座组成。行走车底盘采用宽幅设计,并结合橡胶衍生支撑底座,提供了较大的接地面积与附着摩擦力。云台作为上部负载,其整体质心通过结构优化与重心调节滑轨被控制在较低位置,有效降低了整车的重心高度。在真实的温室环境中以典型作业速度 0.5 m/s 行驶,装置全程未出现任何倾覆趋势或失稳现象。



图 16 移动式表型采集装置验证试验

Fig. 16 Validation test of mobile phenotyping device

4.2 车体行驶过程中稳衡效果测试与分析

为系统验证稳衡云台在真实设施场景下的综合性能,制定了具体的整车试验方案:在温室行间环境下,使采集车以速度 0.5 m/s 匀速行驶,以此模拟真实作业工况并激发 $3 \sim 6 \text{ Hz}$ 的地面振动。试验的核心在于,通过云台与车体集成的双 IMU,波特率 $230\,400 \text{ b/s}$,同步采集 13 s 内云台的三轴姿态角数据,旨在精确评估与对比基础 PID 控制与本文提出的复合控制策略,在抑制动态扰动方面的性能差异。

基于上述试验方法,采集并分析云台在行驶过程中的姿态数据。通过对云台横滚轴、俯仰轴、偏航轴的姿态控制曲线进行精细化对比,可清晰展现基础 PID 与复合控制策略的性能差异,结果如图 17 所示。

从横滚轴角度变化曲线来看,基础 PID 控制横滚角受地面不平整的垂向冲击扰动极强,姿态曲线呈现大幅值、宽范围、无规则振荡特征,瞬时偏差多次突破 $\pm 2^\circ$,振荡频率杂乱且峰值持续时间长,系统对垂向耦合扰动的抗穿透性不足,导致横滚方向姿态稳定性极差,无法为表型采集提供稳定的横向视角基准。复合控制策略下横滚角振荡范围在 $\pm 0.5^\circ$ 。尽管因横滚轴直接承载地面激励仍存在高

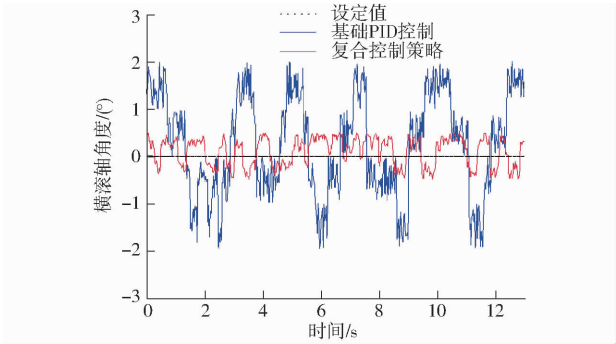


图 17 横滚轴角度变化曲线
Fig. 17 Roll axis variation curves

频波动,但波动幅度较基础 PID 降低超 65%,且无持续性大峰值偏差与系统性漂移。这表明复合控制通过重力+角加速度双前馈-改进串级 PID 复合,实现了对垂向强扰动的主动卸荷-抑制,大幅提升了横滚方向的姿态保持能力。

如图 18 所示,从俯仰轴角度变化曲线来看,基础 PID 控制俯仰角受车体俯仰运动的耦合干扰显著,呈现中幅度、周期性振荡+超调衰减缓慢现象,偏差范围在 $\pm 1^\circ$,且振荡过程中存在明显的超调-持续振荡-缓慢衰减过程,说明单纯 PID 难以快速抑制车体俯仰向的动态干扰,会导致表型采集视角在俯仰方向出现持续性偏移,影响成像一致性。复合控制策略下俯仰角偏差稳定控制在 $\pm 0.3^\circ$,振荡形态转变为高频小幅度微振。系统对车体微小俯仰运动具备快速跟随性,通过角加速度双前馈补偿模块对大幅扰动的主动抵消,抑制了振荡幅值与持续时间,实现了俯仰向姿态的精准稳定双保障。

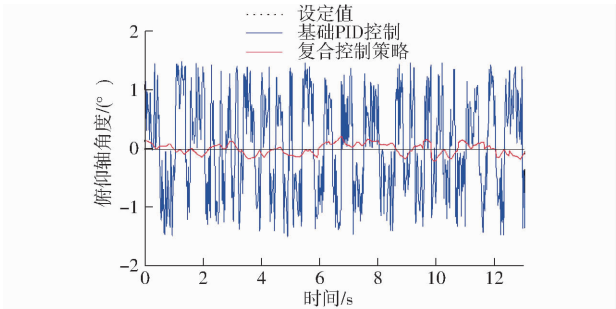


图 18 俯仰轴角度变化曲线
Fig. 18 Pitch axis variation curves

如图 19 所示,从航向轴角度变化曲线来看,基础 PID 控制偏航角存在中等幅度、无规则振荡,偏差范围约为 $\pm 0.5^\circ$,反映出系统对航向类弱干扰的抑制精度不足,会导致表型采集的航向基准偏移,影响多帧图像的拼接与表型特征的空间对应性。复合控制策略下偏航角展现出最优的控制精度与抗扰性,偏差在 $\pm 0.2^\circ$ 的极窄范围,振荡几乎呈微幅抖动状态。对车体微转向、环境气流等弱干扰实现了精准识别-快速抑制,为表型采集提供了稳定的航向基准。

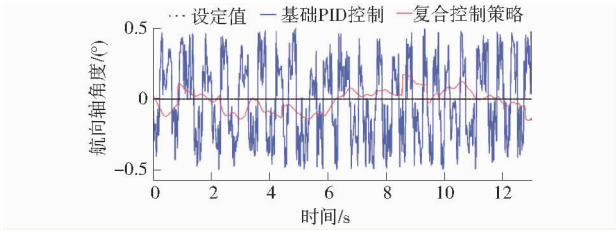


图 19 航向轴角度变化曲线
Fig. 19 Yaw axis variation curves

相较于基础 PID 控制,复合控制策略通过重力+角加速度双前馈-改进串级 PID 复合的协同机制,实现了对设施地面不平整扰动的有效抑制。最终使云台三轴姿态均以高频小幅度振荡围绕零值动态平衡,完全满足设施蔬菜高通量表型采集对姿态偏差在 $\pm 0.5^\circ$ 内、动态响应无明显超调的苛刻要求,验证了硬件结构+复合控制策略系统方案的工程有效性,为设施农业复杂环境下表型采集的姿态稳定问题提供了技术可行的解决方案。

5 结论

(1)设计的稳衡云台结构实现了高负载-重心调节-可变拍摄方向 3 项功能。采用 Aluminum Alloy 6061 材料,在负载 15 kg 下最大形变仅 0.776 mm。集成 X-Y-Z 轴重心调节滑轨,将重心偏差控制在 ± 5 mm 以内,重力矩波动小于 0.5 N·m。结构动力学分析表明,其一阶固有频率远高于环境主激励,有效避免了共振。

(2)围绕温室场景下云台多源扰动抑制需求,构建了重力补偿角加速度双前馈-改进串级 PID 复合控制框架,首先构建重力补偿前馈模型,继而采用内环速度环+外环位置环改进串级 PID,引入积分分离等机制将稳态误差降至 0.1° ,最后通过双 IMU 融合与牛顿-欧拉方程,实现加速度前馈以抵消采集车惯性扰动,形成前馈预抑制+反馈精调节的协同控制方案。

(3)针对传统 PID 积分饱和,对重力/惯性扰动抑制弱的问题,重力补偿角加速度双前馈-改进串级 PID 复合控制开展验证与性能测试。重力补偿前馈模型精度达 $R^2=0.9912$,改进后串级 PID 稳态误差 0.1° 。经阶跃与加速度扰动测试,复合控制使系统响应时间缩短 80% 且无超调,可抵消 $2\sim 3\text{ m/s}^2$ 惯性扰动,稳态误差小于 0.5° 。

(4)云台稳衡试验结果表明,对比基础 PID,重力+角加速度双前馈-改进串级 PID 复合控制,可使横滚轴角度振荡从 $\pm 2^\circ$ 缩至 $\pm 0.5^\circ$ 、俯仰轴角度从 $\pm 1^\circ$ 缩至 $\pm 0.3^\circ$ 、航向轴角度从 $\pm 0.5^\circ$ 缩至 $\pm 0.2^\circ$,无超调且满足姿态偏差 $-0.5^\circ\sim 0.5^\circ$ 要求。

参 考 文 献

- [1] 宋鹏, 李正达, 杨蒙, 等. 作物表型机器人研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2025, 56(3): 1–17.
SONG Peng, LI Zhengda, YANG Meng, et al. Current status and prospects of crop phenotyping robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(3): 1–17. (in Chinese)
- [2] PATRICK A, PELHAM S, CULBREATH A, et al. Highthroughput phenotyping of tomato spot wilt disease in peanuts using unmanned aerial systems and multispectral imaging [J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2017, 20(3): 4–12.
- [3] BAI G, GE Y F, HUSSAIN W, et al. A multi-sensor system for high throughput field phenotyping in soybean and wheat breeding[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 128: 181–192.
- [4] SANKARAN S. High-throughput and precision phenotyping for cereal breeding programs [J]. Resource Magazine, 2016, 23(3): 24–25.
- [5] PASK A J, PIETRAGALLA J, MULLAN D M, et al. Physiological breeding II: a field guide to wheat phenotyping [M]. Mexico City: CIMMYT, 2012.
- [6] THOMPSON A L, THORP K R, CONLEY M M, et al. Comparing nadir and multi-angle view sensor technologies for measuring in-field plant height of uplandcotton[J]. Remote Sensing, 2019, 11(6): 700.
- [7] SHAFIEKHANI A, KADAM S, FRITSCHI F, et al. Vinobot and vinocular: two robotic platforms for high-throughput field phenotyping[J]. Sensors, 2017, 17(1): 214.
- [8] SYED T N, JIZHAN L. Seedling-lump integrated non-destructive monitoring for automatic transplanting with Intel RealSense depth camera[J]. Artificial Intelligence in Agriculture, 2019, 3: 18–32.
- [9] CALERA E S, OLIVEIRA G C, ARAUJO G L, et al. Under-canopy navigation for an agricultural rover based on image data [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2023, 108(2): 29.
- [10] FAN Z, SUN N, QIU Q, et al. In situ measuring stem diameters of maize crops with a high-throughput phenotyping robot[J]. Remote Sensing, 2022, 14(4): 1030.
- [11] SHAFIEKHANI A, KADAM S, FRITSCHI F B, et al. Vinobot and vinocular: two robotic platforms for high-throughput field phenotyping[J]. Sensors, 2017, 17(1): 214.
- [12] YOUNG S N, KAYACAN E, PESCHEI J M. Design and field evaluation of a ground robot for high-throughput phenotyping of energy sorghum[J]. Precision Agriculture, 2019, 20(4): 697–722.
- [13] 唐政, 余越, 刘羽飞, 等. 田间作物表型获取无人车平台主体结构设计与优化[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2023, 49(2): 280–292.
TANG Zheng, YU Yue, LIU Yufei, et al. Design and optimization of main structure of unmanned vehicle-based field crop phenotyping platform[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2023, 49(2): 280–292. (in Chinese)
- [14] 邱小雷, 张小虎, 李彦, 等. 作物表型巡检机器人实验平台设计与教学应用[J]. 教育教学论坛, 2024, 39: 21–24.
QIU Xiaolei, ZHANG Xiaohu, LI Yan, et al. Design and teaching application of experimental platform for crop phenotype inspection robot[J]. Education and Teaching Forum, 2024, 39: 21–24. (in Chinese)
- [15] 潘宇真, 魏佳炜, KHAN Rezwan Al Islam, 等. 新型模块化农业机器人设计分析与冗余协同控制[J]. 机械工程学报, 2024, 60(23): 88–101.
PAN Yuzhen, WEI Jiawei, KHAN R A I, et al. Design and analysis of a novel modular agricultural robot with its redundant cooperative control strategy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(23): 88–101. (in Chinese)
- [16] UMEMO T, KANEKO T, HORI Y. Robust servosystem design with two degrees of freedom and its application to novel motion control of robot manipulators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1993, 40(5): 473–485.
- [17] 李嘉全, 丁策, 孔德杰, 等. 基于速度信号的扰动观测器及在光电稳定平台的应用[J]. 光学精密工程, 2011, 19(5): 998–1004.
LI Jiaquan, DING Ce, KONG Dejie, et al. Velocity based disturbance observer and its application to photoelectric stabilized platform[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(5): 998–1004. (in Chinese)
- [18] 谢巍, 何忠亮. 采用改进型扰动观测器的控制方法[J]. 控制理论与应用, 2010, 27(6): 695–700.
XIE Wei, HE Zhongliang. Control method with improved disturbance observer[J]. Control Theory and Applications, 2010, 27(6): 695–700. (in Chinese)
- [19] 高嵩, 徐晓霞, 肖秦琨, 等. 机载光电跟踪系统的模糊自适应控制[J]. 西安工业大学学报, 2009, 29(6): 565–569.
GAO Song, XU Xiaoxia, XIAO Qingkun, et al. Research on fuzzy PID control of airborne electro-optical pointing and tracking systems[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2009, 29(6): 565–569. (in Chinese)
- [20] 朱海荣, 李奇, 顾菊平, 等. 扰动补偿的陀螺稳定平台单神经元自适应 PI 控制[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(3): 65–

70,77.

ZHU Hairong, LI Qi, GU Juping, et al. Single-neuron adaptive PI control of the gyrostabilized platform based on disturbance compensation[J]. Electric Machines and Control, 2012, 16(3): 65 – 70,77. (in Chinese)

[21] HERVÉ J M. Uncoupled actuation of pan-tiltwrists[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2006, 22(1): 56 – 64.

[22] 仇笑天. 基于布谷鸟搜索的伺服云台控制器设计[J]. 电气自动化,2021,43(3): 80 – 82,98.

QIU Xiaotian. Design of a servo PTZ controller based on cuckoo search[J]. Electrical Automation,2021,43(3): 80 – 82,98. (in Chinese)

[23] GHASEMI A, AZIMI M M. Adaptive fuzzy PID control based on nonlinear disturbance observer for quadrotor[J]. Journal of Vibration and Control, 2023, 29(13 – 14): 2965 – 2977.

[24] CUI Y, YANG Y, ZHAO L, et al. Composite control for gimbal systems with multiple disturbances: analysis, design, and experiment[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2023, 53(8): 4789 – 4798.

[25] GHEISARNEJAD M. An effective hybrid harmony search and cuckoo optimization algorithm based fuzzy PID controller for load frequency control[J]. Applied Soft Computing, 2018, 65: 121 – 138.

[26] 李军,吴喜春. 基于图像识别与 PID 控制的巡检摄像机预置位自动纠偏技术研究[J]. 机电信息,2024(20):85 – 88.

LI Jun, WU Xichun. Research on automatic correction technology of inspection camera preset position based on image recognition and PID control[J]. Electromechanical Information,2024(20):85 – 88. (in Chinese)

[27] 李泽楷,鄢志丹,陈璨. 一种滞后补偿与干扰抑制的高速云台控制方法[J]. 计算机工程,2025(9):1 – 10.

LI Zekai, YAN Zhidan, CHEN Can. A gimbal control method based on lag compensation and disturbance suppression[J]. Computer Engineering,2025(9):1 – 10. (in Chinese)

[28] 王鑫, 薛书棋, 李楠, 等. 重力仪基准棱镜的高精度电磁悬浮控制及前馈补偿方法[J]. 中国惯性技术学报, 2023, 31(7): 696 – 706.

WANG Xin, XUE Shuqi, LI Nan, et al. High precision electromagnetic control and feedforward compensation of gravimeter reference prism[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2023, 31(7): 696 – 706. (in Chinese)

[29] MERIAM J L, KRAIGE L G, BOLTON J N. Engineering mechanics: dynamics[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2020.

[30] 王六平. PID 控制系统设计: 使用 MATLAB 和 Simulink 仿真与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2023.

[31] AI DIN I N. Using Newton'sinterpolation and aitken's method for solving first order differential equation[J]. World Applied Sciences Journal, 2020, 38(3): 191 – 194.

[32] 杨树德, 司舒洁, 张新闻, 等. 一种基于积分分离思想的改进重复控制策略[J]. 智慧电力, 2025, 53(9): 99 – 107.

YANG Shude, SI Shujie, ZHANG Xinwen, et al. An improved repetitive control strategy based on integral separation principle [J]. Smart Power, 2025, 53(9): 99 – 107. (in Chinese)