

卢少志, 杨蒙, 杨万能, 等. 田间作物表型检测平台设计与试验[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(4): 209-218.

DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2021.04.025

田间作物表型检测平台设计与试验

卢少志^{1,2}, 杨蒙¹, 杨万能^{1,2}, 叶军立¹, 李为坤¹, 宋鹏¹

1. 华中农业大学作物遗传改良国家重点实验室, 武汉 430070; 2. 华中农业大学工学院, 武汉 430070

摘要 为高灵活动、稳定有效地获取田间作物表型信息, 设计了一种四轮独立驱动、独立转向的田间作物表型检测平台, 该平台主要包括行走系统、控制系统和表型信息采集系统, 采用 Creo 软件对平台进行结构设计并对主体框架不同工况进行有限元仿真分析。以西门子 1200 系列 PLC 为主控制器开发了一套控制系统, 实现平台的原地转向、横向移动和阿克曼转向模式控制, 采用基于模糊 PID 的四轮协同控制方法实现了四轮同步运动。设计的检测平台可根据检测需求挂载 RGB 相机、热红外相机、高光谱相机等不同传感器进行表型信息采集, 并在采集过程中形成移动暗室, 有效降低外界环境对表型信息采集效果的影响。田间试验结果显示: 设计的检测平台在满电量状况下单次不间断作业可达 6 h; 四轮协同运动试验结果显示, 车轮转速最大偏差率为 1%, 在水泥地面和田间直线行驶时平均偏移率分别为 2.14% 和 2.57%, 具有良好的移动稳定性; 挂载 RGB 和热红外相机进行作物表型信息获取时, 每小时可检测 120 个田间育种小区; 在不同时间段, 分别采集非暗室环境与暗室环境下棉花 RGB 图像并提取叶面积, 结果表明平台所采集 RGB 图像更加稳定可靠; 对暗室环境下 RGB 图像、热红外和高光谱图像进行采集分析, 结果表明该平台所采集图像均质量良好且可获得有效信息。

关键词 田间作物; 表型信息; 表型检测; 移动暗室; 模糊控制; 作物信息采集; 图像采集; 作物育种

中图分类号 S 503; TP 391.43 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2021)04-0209-10

随着基因技术的迅猛发展, 表型检测技术已成为制约作物育种的主要瓶颈之一^[1]。传统的表型检测方法标准难以统一且费时费力, 迫切需要实现作物表型信息的高效率、高质量获取^[2]。

随着信息技术的发展, 国内外已研发出悬索式、车载式、导轨式和移动式等多种田间作物表型检测平台。如 Kirchgessner 等^[3]和 Bai 等^[4]开发了一种悬索式田间作物表型检测平台, 该平台由多根柱子和电缆组成, 挂载的传感器可沿电缆移动, 采集该区域内的植物表型参数, 但移动较为困难, 只能针对固定地块进行信息采集。Barker 等^[5]、Meacham-hensold 等^[6]以及 Andrade-sanchez 等^[7]开发了一种基于车载平台的表型检测装备, 多种光学检测传感器随车载平台移动, 采集植株多角度图像, 但此类平台在信息采集过程中受外界环境影响较大, 例如外界风或太阳光较强烈时, 信息采集效果较差。Shafiekhani 等^[8]研发了一种双机器人协作的表型分析平台, 该系统通过移动观察塔监视整个田野并为地面移动车辆提供植物精准坐标, 使移动车辆更

精准前往待检测作物以便节省时间, 该系统适用于不同地块检测, 但信息采集效果仍受外界环境影响。Busemeyer 等^[9]采用拖拉机牵引表型采集传感器进行田间移动, 并采用黑色帆布遮蔽以降低外界光照对数据采集效果的影响, 但该系统需要拖拉机提供牵引力, 无法实现自主行走。Virlet 等^[10]设计了一种田间导轨式表型检测平台, 进行导轨区域内作物表型性状提取, 该系统可在较为恶劣环境下进行信息采集, 但其成本较高且无法实现不同地块采集。王康等^[11]开发了一种移动式田间信息自动采集装置, 其可根据磁条铺设轨迹自动行走并完成 RGB 图像的实时采集与保存, 但其无法实现红外图像和高光谱图像的采集, 并且表型信息采集效果易受外界环境影响。

总体而言, 现有田间表型检测平台或者移动不便, 或者信息采集效果易受外界环境条件影响。针对以上情况, 本研究设计了一种可灵活、高效、稳定地采集田间作物表型信息的检测平台, 旨在进一步提高田间作物表型信息检测效率和质量, 为优良作物品种的快速培育提高技术支持。

收稿日期: 2021-05-12

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31770397); 华中农业大学新教师科研启动专项(2662019QD053)

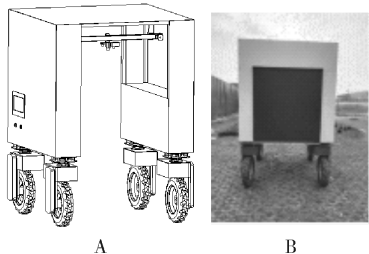
卢少志, E-mail: 1211895119@qq.com

通信作者: 宋鹏, E-mail: songp@mail.hzau.edu.cn

1 材料与方法

1.1 检测平台结构设计

1)整体结构设计。大量作物表型性状可通过冠层信息解析获得,故本移动平台设计为跨行式检测,主要由行走系统、控制系统和表型信息采集系统组成。行走系统包括驱动部分、转向部分、车架等;控制系统由主控制器、工控机、触摸屏、遥控接收等部件组成;表型信息采集平台则包括采集传感器、移动导轨、LED 光源、可升降遮光布(可根据作物高度调节遮光布高度)等。采用 Creo 软件对检测平台进行结构设计,检测平台整体结构如图 1A 所示,暗室状态实物图如图 1B 所示。



A:检测平台结构图 Platform structure diagram; B:暗室状态实物图 Physical diagram of darkroom state.

图 1 田间作物表型检测平台

Fig.1 Field crop phenotype detection platform

由于不同作物生长高度不同,如玉米成熟期植株较棉花、油菜、小麦等更高,一般为 1.8 m^[12]。为兼顾不同作物表型检测需求,结合其种植方式,设计检测平台长宽高分别为 1 700、1 750、2 650 mm,其中表型检测传感器末端距离地面高度为 2 200 mm。由于农田作业环境复杂,检测平台需具备良好的驱动能力来适应田间土壤状况。检测平台主要结构参数如表 1 所示。

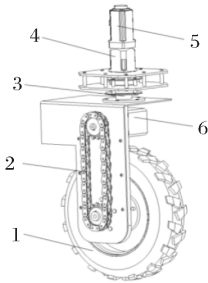
表 1 检测平台主要结构参数

Table 1 Main structural parameters of the platform

参数 Parameters	数值 Value
长×宽×高/mm×mm×mm Length×width×height	1 700×1 750×2 650
整体质量/kg Overall mass	510
最大行驶速度/(km/h) Maximum travel speed	>3.6
最小转弯半径/mm Minimum turning radius	<2 500
传感器横向移动距离/mm Sensor lateral movement distance	1 000
传感器距地面高度/mm Height of sensor from ground	2 200
续航能力/h Endurance	6

2)行走系统设计。为保证田间作物表型信息灵

活稳定地检测,需在满足检测平台灵活移动的同时减小移动过程的晃动^[13]。为此,在满足车轮承重能力的前提下,选用直径 560 mm、宽 180 mm 的人字纹橡胶轮胎,采用四轮独立驱动、独立转向的移动方式^[14],主控制器通过驱动器分别控制驱动电机和转向电机运动。行走系统单个轮组结构如图 2 所示,其中驱动方式采用链传动,转向方式采用法兰盘连接传动。



1.轮胎 Tire; 2.传动链条 Transmission chain; 3.旋转主轴 Rotating main shaft; 4.转向电机减速器 Steering motor reducer; 5.转向电机 Steering motor; 6.驱动电机 Drive motor.

图 2 单个轮组结构图

Fig.2 Single wheel structure diagram

① 驱动电机选择。平台移动时主要受到滚动阻力、空气阻力、加速阻力以及坡道阻力。因其使用场景为田间,且移动速度较慢,忽略空气阻力和加速阻力,本研究只考虑滚动阻力和坡道阻力^[15]。平台受力:

$$F_t = \sum F = F_f + F_i \quad (1)$$

$$F_f = mgf_1 \quad (2)$$

式(2)中: f_1 为田间滚动摩擦系数,取 0.2^[16]。其中:爬坡时,其坡道阻力为其沿坡道的分力,计算公式为:

$$F_i = mgsina + mgf_1cosa \quad (3)$$

其中: a 为最大坡度,取 30°。

驱动电机转矩为:

$$T = \frac{F_t \times R}{2N \times \eta \times i_1} \quad (4)$$

其中: R 为车轮直径,m,取值为 0.56; N 为驱动电机个数,为常量 4; η 为驱动单元整体效率,取 0.8^[17]; i_1 为驱动电机减速比,为常量 50。

驱动电机功率为:

$$P = \frac{T \times n}{9550} \quad (5)$$

其中, n 为驱动电机实际最大转速,取 1 700 r/min。

根据以上公式得出驱动电机所需最大扭矩和最大功率分别为 $T=7.64 \text{ N} \cdot \text{m}$, $P=1\ 360 \text{ W}$ 。

② 转向电机选择。车轮在转动时主要受到地面摩擦阻力,故转向电机的转矩和功率应满足动力大于等于地面摩擦力^[18]。转向电机转矩:

$$M_p = \frac{mgf_2 r}{6i_2} \quad (6)$$

其中: f_2 为车轮与地面静摩擦力,取 0.5; r 为车轮半径,取 0.28 m; i_2 为转向电机减速比,为常量 50。

转向电机功率为:

$$P = \frac{M_p \times n}{9550} \quad (7)$$

其中, n 为转型电机实际最大转速,取 2 500 r/min。根据以上公式得出转向电机所需最大扭矩和最大功率分别为 $M_p=7.64 \text{ N} \cdot \text{m}$, $P=610 \text{ W}$ 。根据以上测算,选择的行走系统驱动电机和转向电机主要参数如表 2 所示。

表 2 电机参数
Table 2 Motor parameters

参数 Parameters	驱动电机 Driving motor	转向电机 Steering motor
型号 Model	130SM-20025B-Z	80SM-07530B-Z
额定电压/V Rated voltage	DC48	DC48
额定电流/A Rated current	45	20
额定功率/kW Rated power	1 500	750
额定转速/最大转速/(r/min) Rated speed/maximum speed	2 500/3 000	3 000/5 000
额定转矩/最大转矩/(N·m) Rated torque/maximum torque	7.7/14.0	2.39/3.80
电机防护等级 Motor protection level	Ip65	Ip65
电机绝缘等级 Motor insulation class	F	F

3) 机架有限元分析。为提高仿真效果,忽略焊接对材料的影响^[19]。设置材料属性为不锈钢,材料密度 $7\ 720 \text{ kg/m}^3$,杨氏模量为 $2 \times 10^5 \text{ MPa}$,泊松比为 0.28,设置最大元素控制尺寸为 5 mm,应力-应变为线性响应;根据机架的总载荷与实际受力,以满载极限工况下设置移动速度为 3.6 km/h,分别对满载四轮着地运动状态(图 3)、满载三轮着地运动状态(图 4)进行分析。图 3 显示,在满载四轮着地状态下,机架的最大变形发生在机架与车轮连接杆的中心位置,最大变形量为 4.500 mm,机架的最大等效弹性形变和最大等效应力显示不明显;从结果可以看出,满载四轮着地时,机架能够满足田间行驶要求。田间环境地面情况复杂,在田间作业时,4 个轮

组的受力无法绝对均衡。因本检测平台设计时整体对称,在此以满载左前轮悬空,另外三轮着地且受力均衡的情况进行分析(图 4)。由图 4 可知,满载左前轮悬空三轮着地状态下,机架最大变形发生在右侧机架与车轮连接杆的中心位置,最大变形量为 6.932 mm,机架的最大等效弹性形变和最大等效应力显示不明显;满载三轮着地极限工况下,右侧机架侧梁位移较四轮着地时略有增大,从机架实际尺寸和材料属性来看,机架不会失效,可满足使用需求^[20]。

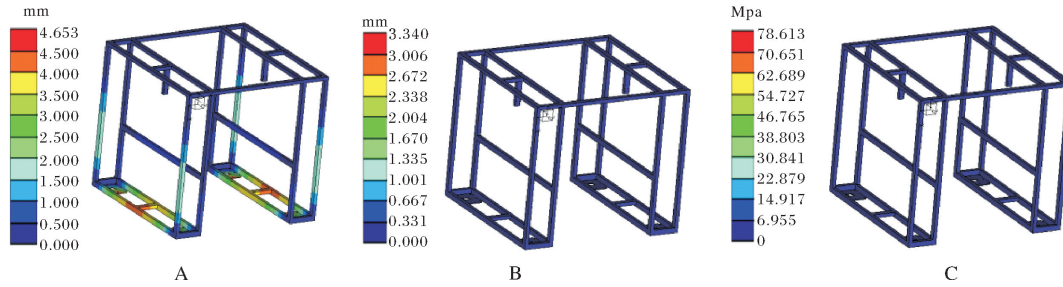
1.2 平台控制系统设计

1) 控制原理。控制系统由平台运动控制和表型信息采集控制两部分组成,平台主控制器选用西门子 1212C (DC/DC/DC) PLC,其中运动控制部分还包括伺服驱动器、位置传感器等。表型信息采集控制部分还包括采集传感器、移动导轨、LED 光源、可升降遮光布等。

控制系统原理如图 5 所示,由于不同表型检测传感器的采集方式不同,为保证表型数据获取的稳定性,平台采用遥控控制。为提高平台运动灵活性,设计了原地转向、横向移动、阿克曼转向 3 种运动模式。具体过程为:遥控器通过 2.4 GHz 频道将指令传送给 SBUS 接收机,根据 SBUS 协议将指令传送给主控制器,主控 PLC 解析指令后实现对行走系统和表型信息采集系统的控制,行走系统由伺服电机驱动器通过 485 通讯进行控制,实现搭载表型检测传感器的移动导轨左右移动控制(采集高光谱图像时需要用到)及表型数据获取触发控制。

2) 控制方法。由于本平台应用场景为田间环境,田间环境较为复杂,车轮所受外部阻力也各不相同,传统的控制方法难以满足稳定性要求,设计采用基于模糊 PID 的四轮协同控制算法来保证平台行走稳定性。

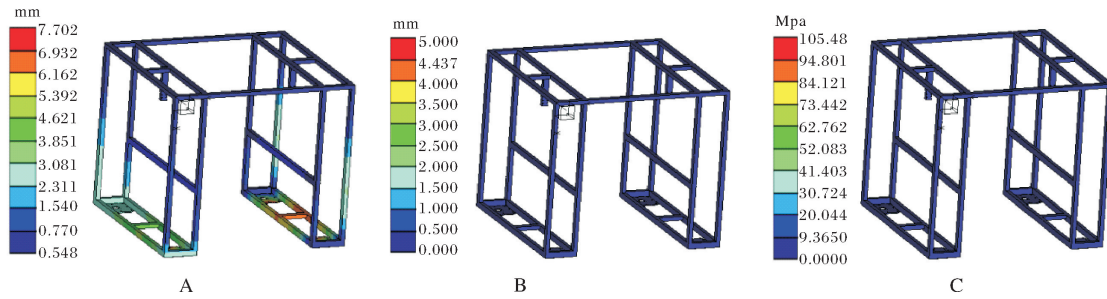
① 模糊 PID 控制结构。主控制器每秒接收 1 次编码器反馈的电机实际转速值,并与目标转速值进行对比,当转速偏差值(偏差值的绝对值)在目标转速值的 1%以内(即偏差率小于等于 1%),则不计误差,其中偏差率界限设定为 1%是经过多次试验得到的;当转速偏差值超过目标转速的 1%,则采用模糊控制算法调节 PID 控制器的比例、积分和微分系数,以控制电机转速误差变小,实现平台的稳定行走。模糊 PID 控制算法原理如图 6 所示。



A:总变形量 Total deformation; B:等效弹性应变 Equivalent elastic strain; C:等效应力 Equivalent stress.

图 3 机架满载四轮着地应变和受力

Fig.3 Analysis of the strain and force of the four-wheeled frame on the ground with full load



A:总变形量 Total deformation; B:等效弹性应变 Equivalent elastic strain; C:等效应力 Equivalent stress.

图 4 机架满载三轮着地应变和受力

Fig.4 Analysis of the strain and force of the three-wheeled frame on the ground with full load

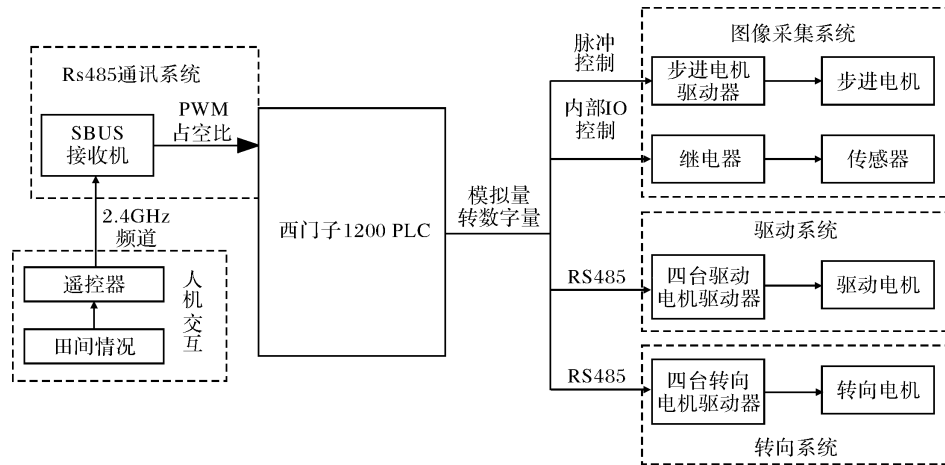


图 5 控制系统原理图

Fig.5 Control schematic diagram

②模糊 PID 控制步骤。控制系统通过对比实际输出转速和目标转速,得到目标转速与输出转速间的偏差值 e 和偏差值变化率 e_c 。 e 和 e_c 的基本论域设定为 $e \in [-0.3, 0.3]$, $e_c \in [-0.2, 0.2]$,经过量化因子 $K_e = 10$, $K_{e_c} = 15$ 将所有输入变量转换到模糊论域 $[-3, 3]$ 。通过分析 PID 控制的 3 个参数对输出转速的影响,制定合理的模糊控制规则,经过模

糊推理后输出的仍然是模糊变量,因此采用面积重心法^[21]进行解模糊输出,转化成确定的 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d ,再经由式(8)计算后发送给给 PID 控制器,从而实现参数的实时调整。

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + \Delta K_p \\ K_i = K_{i0} + \Delta K_i \\ K_d = K_{d0} + \Delta K_d \end{cases} \quad (8)$$

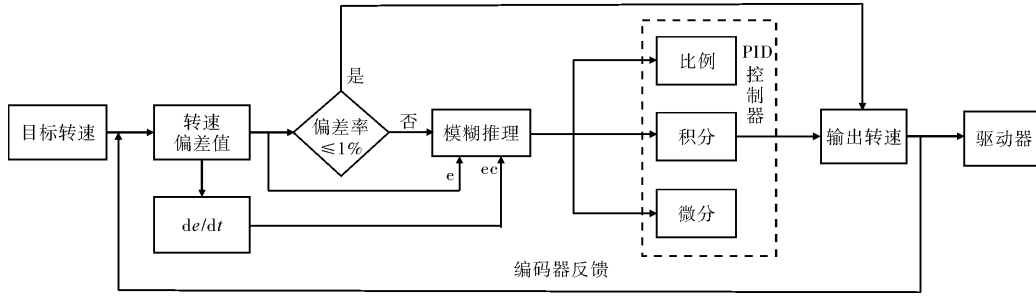


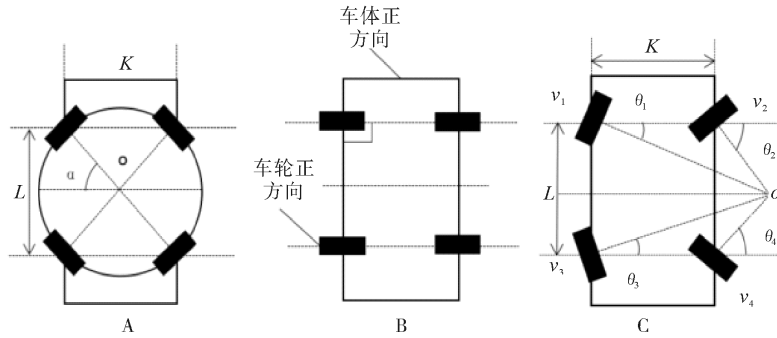
图6 模糊PID控制算法原理图

Fig.6 Fuzzy PID control algorithm principle diagram

式(8)中, K_{p0} 、 K_{i0} 、 K_{d0} 为PID控制参数的初始设定值。

3)运动模式。由于田间地形复杂多变,为使平

台进行田间作物表型检测作业时灵活移动、节省转弯空间,设计了多种运动模式,包括原地转向、横向移动和阿克曼转向^[22],如图7所示。



A: 原地转向 Turn on the spot; B: 横向移动 Move laterally; C: 阿克曼转向 Turn by Ackerman.

图7 3种运动模式示意图

Fig.7 Schematic diagram of three movement modes

①原地转向模式。当左前轮和右后轮顺时针旋转角度 α ,右前轮和左后轮逆时针旋转角度 α ,装备处于原地转向模式,此时转弯半径达到最小,田间地头转向时可节省转弯空间。图7A中, L 表示轴距,为1407 mm, K 表示四轮间距,为1461 mm,4个车轮在原地转向模式下,要转动的角度为 α 。4个车轮转动的角度 α 即为:

$$\alpha = \arctan \frac{L}{K} \quad (9)$$

经计算得 $\alpha = 46^\circ$,故原地转向模式下左前和右后2个轮子顺时针转动 46° ,右前和左后2个轮子逆时针转动 46° 。本平台长宽分别为1.70、1.75 m,故本平台原地转弯半径小于2.5 m。

②横向移动模式。4个车轮均逆时针转动 90° ,装备处于横向移动模式(图7B)。在作物表型信息采集时,可进行横向运动,实现不同检测行之间的快速切换,确保装备在进行田间作物表型信息采集时移动更加灵活。

③阿克曼转向模式。在进行田间检测作业时,由于路面不平、土地松软等因素,装备行进方向会偏离作物行,阿克曼转向可实现车轮无侧滑转向以保证车辆转弯行驶时各车轮在地面上做纯滚动,减少行驶阻力和轮胎磨损,以实时调整装备的移动方向与作物行保持一致。如图7C所示,阿克曼转向要求在转向时,4个轮子绕着同1个瞬时圆心 O 做纯滚动^[23]。得到以下关系式:

$$\begin{cases} \theta_1 = \theta_2 \\ \theta_3 = \theta_4 \\ \cot\theta_1 - \cot\theta_2 = \frac{2K}{L} \\ \cot\theta_3 - \cot\theta_4 = \frac{2K}{L} \\ v_1 = v_2 \\ v_3 = v_4 \end{cases} \quad (10)$$

满足式(10),平台即可实现阿克曼转向。

2 结果与分析

2.1 续航时间

移动平台实际消耗总功率 P 、负载总电压 U 、负载总电流 I 满足关系式: $P = UI$ 。

经实际测得,平台以 1 m/s 速度移动时,负载总电压 $U = 48$ V,负载总电流 $I = 30.5$ A,平台总功率 P 为 1 464 W,要求选择的电源能满足小车工作 6 h,所需电池组容量为 8 784 W · h,因伺服电机额定电压为 48 V,故选用 4 块单体额定电压 12 V、额定容量为 200 A · h 的蓄电池串中,电量每下降 10% 记录对应续航时间,当显示电量剩余 10% 时试验停止,记录总续航时间。试验结果表明,表型检测平台在试验过程中运动平稳,电池和电机均无过热现象,且电池电量下降均匀。当平台以 3.6 km/h 速度行驶时,总续航时间可达到 6 h;当平台以 1.8 km/h 速度行驶时,平台续航时间可达 6.3 h(图 8)。

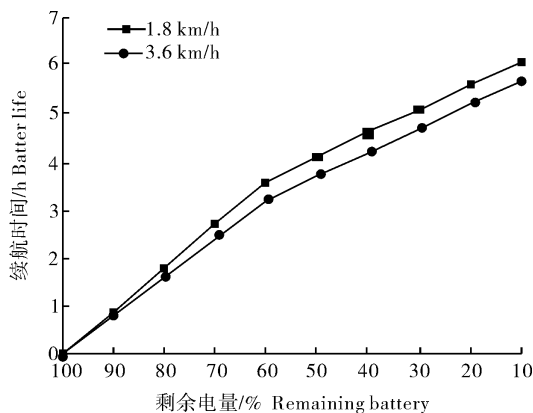


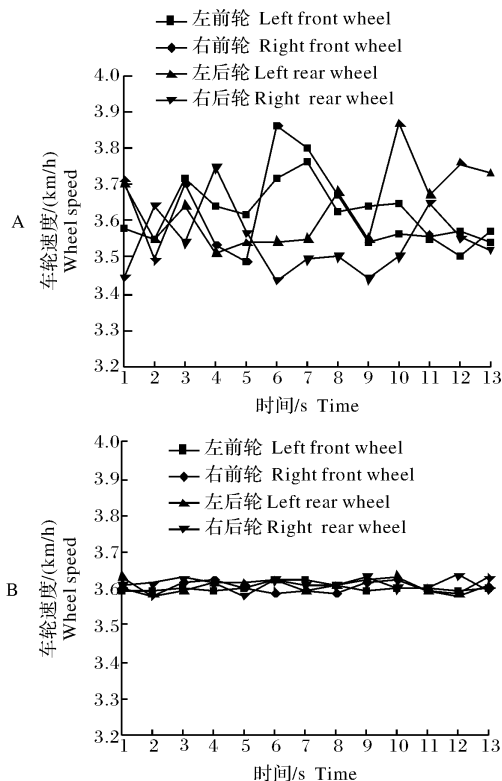
图 8 续航时间试验

Fig.8 Endurance test results

2.2 四轮协同运动

本检测平台主要通过基于模糊 PID 的四轮协同运动来实现平台稳定行走,为了验证四轮协同运动算法的有效性,分别在有模糊 PID 算法和无模糊 PID 算法的情况下,控制移动平台在田间以 3.6 km/h 的速度进行直线行走,实时读取并记录编码器测量得到的车轮转速值(图 9)。试验结果表明,在无模糊 PID 控制下,4 个车轮的转速

偏差较大,最大偏差率为 7.4%,在模糊 PID 控制算法下,4 个车轮的转速偏差较小,最大偏差率为 1%。



A:无模糊 PID 控制 No fuzzy PID control; B:模糊 PID 控制 Fuzzy PID control.

图 9 四轮协同运动测试结果

Fig.9 Four-wheel collaborative exercise test results

2.3 直线行驶偏移率试验

在空旷的作物种植场地上标出平台行驶的 15 m 长的边界线和起始终止线,调整平台前进方向与起始线平行,起始线与边界线重合点记为点 1,控制平台以 1 m/s 的速度行驶,直至平台任一位置到达终止线,平台与终止线的重合点记为点 2,测量点 1 和点 2 的偏距 c 。记录每次试验的偏距,重复 3 次试验(表 3)。偏移率 p :

$$p = \frac{c}{l} \times 100\% \quad (11)$$

式(11)中, c 为偏距,mm; l 为测试区长度,为 15 m。由表 3 可知,该平台在水泥地面和田间直线行驶时平均偏移率分别为 2.14% 和 2.57%,可知该平台直线行驶性能稳定,可满足使用需求^[24]。

表 3 平台直线行驶偏移率试验结果
Table 3 Straight driving deviation rate test results

工况 Working condition	序号 Number	偏距/mm Offset	偏移率/% Offset rate	平均偏距/mm Mean offset	平均偏移率/% Average deviation rate
水泥地面 Concrete floor	1	330	2.20	321.3	2.14
	2	315	2.10		
	3	319	2.13		
田间 Field	1	389	2.59	385.0	2.57
	2	375	2.50		
	3	390	2.60		

2.4 田间表型信息采集效率

为验证本平台的田间表型信息采集效率,挂载成像速度快的 RGB 相机和热红外相机进行试验。控制平台以 3.6 km/h 的速度移动至待测育种小区上方后,停止,并控制相机进行图像采集,采集结束后,继续以相同速度沿作物行移动至下一育种小区,移动至本行尽头时,换行进行下一行检测。每个小区分别采集 1 张图片。试验结果表明,本平台在 1 h 可采集 120 个小区的表型信息(图 10)。在此条件下,其检测效率为 120 小区/h。



图 10 移动平台田间采集效率试验
Fig.10 Field collection efficiency test
of mobile platform

2.5 表型信息采集效果

田间作物表型信息采集与处理试验于 2020 年 9 月在湖北省武汉市华中农业大学棉花试验田进行,该试验田中育种材料以 1 m×1 m 种植,行间距为 0.5 m,行内每个育种小区间距 0.2 m。采用本研究所表型检测平台挂载大恒 RGB 相机、IRAY at600 热红外相机和 SPECIM fx10 工业高光谱相机采用定点采集方式进行信息采集,并对所采集图像进行预处理。

1)图像采集稳定性试验。本试验分别对非暗室

环境与暗室环境下 08:00、12:00、18:00 3 个时间点进行田间棉花 RGB 图像采集,如图 11A-C 所示为非暗室环境平台采集棉花 RGB 图像,图 11D-F 所示为暗室环境平台采集棉花 RGB 图像,可看出非暗室环境下不同时间点所采集图像有明显差异,暗室环境下不同时间点所采集图像较为一致,更有利于后续处理。

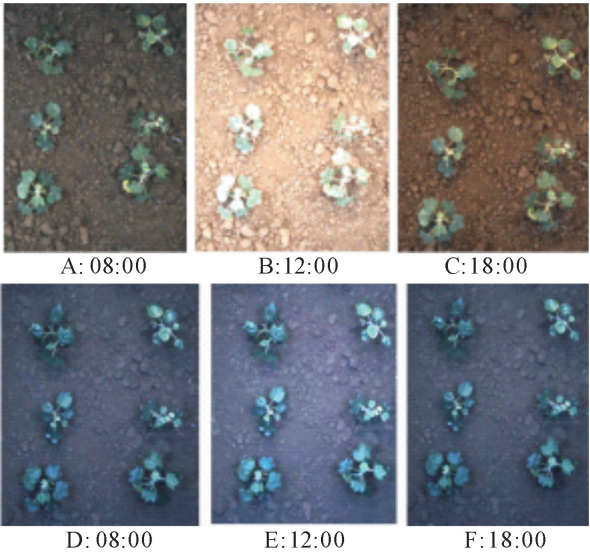
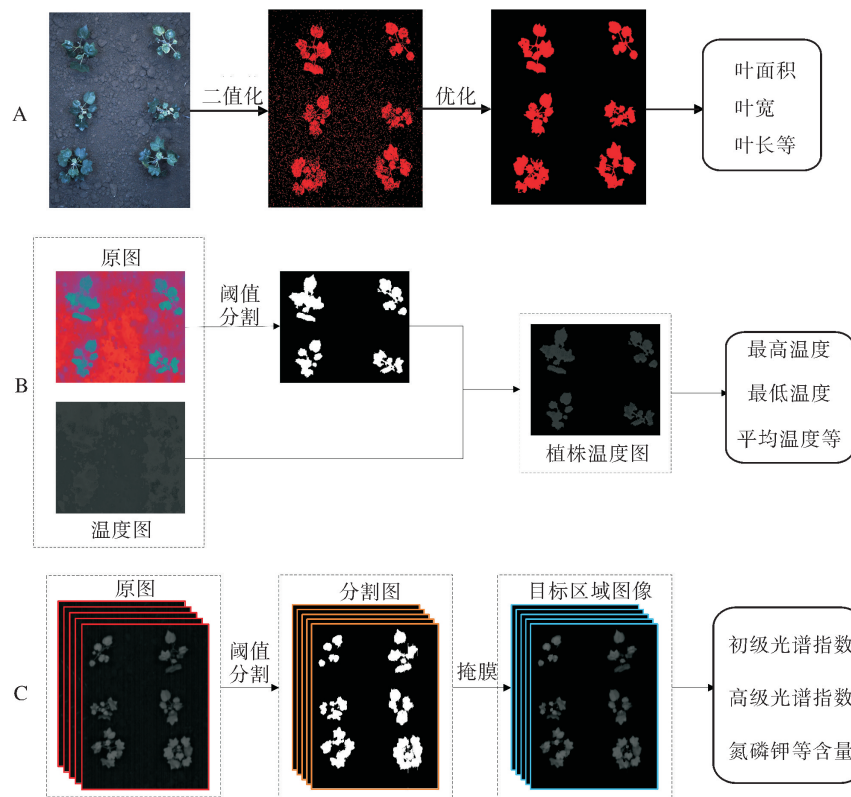


图 11 棉花 RGB 图像

Fig.11 Cotton RGB image

2)表型数据获取。通过对暗室环境下所采集 RGB 图像、红外图像和高光谱图像进行图像处理,可获取大量表型信息。通过图 12A 所示 RGB 图像处理流程图^[25],可获取棉花叶面积、叶长和叶宽等信息;通过图 12B 所示红外图像处理流程图^[26],获取棉花叶片最高温度、最低温度和平均温度等信息;通过图 12C 所示高光谱图像处理流程图^[27],得到初级和高级光谱指数,再经后续处理,可获取氮磷钾等含量信息。



A: RGB 图像处理 RGB image processing; B: 红外图像处理 Infrared image processing; C: 高光谱图像处理 Hyperspectral image processing.

图 12 图像处理流程

Fig.12 Image processing flow

3 讨论

由于田间地形复杂,且常规作物种植方式下行距较为密集,普通车辆无法在田间正常行走,本研究设计了一种田间作物表型检测平台,试验结果显示:一是设计的检测平台灵活性高、稳定性强。设计的检测平台采用四轮独立驱动、独立转向的行走模式,可切换多种运动模式以适应不同的作业环境;检测平台采用模糊 PID 控制算法,在田间行驶时车轮转速最大偏差率为 1%,在水泥地面和田间直线行驶时平均偏移率分别为 2.14% 和 2.57%。二是采集环境稳定,采集效果良好。该平台作业过程中可形成一个移动暗室,并且内置光源,可有效减小外界环境对采集效果的影响,表型信息采集质量更加稳定。三是通用性强。该平台结构采用跨行式且高度较高,可用于不同地块的不同高度作物表型检测作业;可搭载多种不同传感器,获取广泛的作物表型信息。该平台使用跨行式结构可满足行距密集(行距为 0.5 m)情况下的表型信息采集工作,由于配备四轮

独立驱动、独立转向行走系统,可保证在田间灵活移动并不损伤作物。同时,由于平台可悬挂 RGB 相机、热红外相机、高光谱相机对作物进行表型信息采集,这对后续通过图像处理提取相关表型数据和培育高产优质作物具有极为重要的意义。

参考文献 References

- [1] GROSSKINSKY D K, SVENSGAARD J, CHRISTENSEN S, et al. Plant phenomics and the need for physiological phenotyping across scales to narrow the genotype-to-phenotype knowledge gap[J]. *Journal of experimental botany*, 2015, 66(18): 5429-5440.
- [2] KIM S L, SOLEHATI N, CHOI I C, et al. Data management for plant phenomics[J]. *Journal of plant biology*, 2017, 60(4): 285-297.
- [3] KIRCHGESSNER N, LIEBISCH F, YU K, et al. The ETH field phenotyping platform FIP: a cable-suspended multi-sensor system[J]. *Functional plant biology*, 2017, 44(1): 154-168.
- [4] BAI G, GE Y F, SCOBY D, et al. NU-Spidercam: a large-scale, cable-driven, integrated sensing and robotic system for advanced phenotyping, remote sensing, and agronomic research

- [J].Computers and electronics in agriculture,2019,160:71-81.
- [5] BARKER J,ZHANG N Q,SHARON J,et al.Development of a field-based high-throughput mobile phenotyping platform[J].Computers and electronics in agriculture,2016,122:74-85.
- [6] MEACHAM-HENSOLD K,FU P,WU J,et al.Plot-level rapid screening for photosynthetic parameters using proximal hyperspectral imaging[J].Journal of experimental botany,2020,71(7):2312-2328.
- [7] ANDRADE-SANCHEZ P,GORE M A,HEUN J T,et al.Development and evaluation of a field-based high-throughput phenotyping platform[J].Functional plant biology,2013,41(1):68-79.
- [8] SHAFIEKHANI A,KADAM S,FRITSCHI F,et al.Vinobot and vinoculer:two robotic platforms for high-throughput field phenotyping[J/OL].Sensors,2017,17(1):214[2021-05-12].
<http://doi.org/10.3390/s17010214>.
- [9] BUSEMEYER L,MENTRUP D,MÖLLER K,et al.BreedVision:a multi-sensor platform for non-destructive field-based phenotyping in plant breeding[J].Sensors,2013,13(3):2830-2847.
- [10] VIRLET N,SABERMANESH K,SADEGHI-TEHRAN P,et al.Field scanalyzer:an automated robotic field phenotyping platform for detailed crop monitoring[J].Functional plant biology,2016,44(1):143-153.
- [11] 王康,梁秀英,周风燃,等.基于磁导引的履带式小车作物图像自动采集系统设计与试验[J].华中农业大学学报,2020,39(2):141-149.WANG K,LIANG X Y,ZHOU F R,et al. Automatic crop image acquisition system based on crawler car by magnetic guidance[J].Journal of Huazhong Agricultural University,2020,39(2):141-149(in Chinese with English abstract).
- [12] JIANG Y,LI C Y,PATERSON A H.High throughput phenotyping of cotton plant height using depth images under field conditions[J].Computers and electronics in agriculture,2016,130:57-68.
- [13] 姚照胜,刘涛,刘升平,等.农田信息采集车的设计与试验[C]//中国作物学会.2019年中国作物学会学术年会论文集.杭州:中国作物学会,2019:298.YAO Z S,LIU T,LIU S P,et al. Design and experiment of farmland information collection vehicle [C]//Chinese Crop Society. Abstracts of the 2019 Chinese Crop Society Academic Annual Conference.Hangzhou:Chinese Crop Society,2019:298(in Chinese).
- [14] 卓颖莉.四驱轮式移动机器人建模与运动控制研究[D].杭州:浙江大学,2017.ZHUO Y L.Modeling and motion control of a 4-wheel independently driven mobile robot[D].Hangzhou:Zhejiang University,2017(in Chinese with English abstract).
- [15] 郝朝会,杨学军,刘立晶,等.果园多功能动力底盘设计与试验[J].农业机械学报,2018,49(12):66-73,92.HAO Z H,YANG X J,LIU L J,et al.Design and experiment of multifunctional dynamic chassis for orchard[J].Transactions of the CSAM,2018,49(12):66-73,92(in Chinese with English abstract).
- [16] 刘路,杨路,高观光,等.小型烟草植保机移动平台结构设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(4):156-162.LIU L,YANG L,GAO G G,et al.Structural design and test of wheeled tobacco plant protection mobile platform[J].Transactions of the CSAM,2019,50(4):156-162(in Chinese with English abstract).
- [17] 王康.基于磁导引的履带式小车作物图像自动采集系统研究[D].武汉:华中农业大学,2019.WANG K.Research on automatic crop image acquisition system based on crawler car by magnetic guidance[D].Wuhan:Huazhong Agricultural University,2019(in Chinese with English abstract).
- [18] 蔡韶峰.四轮移动小车设计及研究[D].芜湖:安徽工程大学,2018.CAI S F.Design and research of four wheel moving vehicle[D].Wuhu:Anhui Polytechnic University,2018(in Chinese with English abstract).
- [19] 张艺辉,冷峻,张兴明,等.水稻收割机底盘机架 CAE 有限元分析及优化设计[J].农业机械,2021(1):91-97,101.ZHANG Y H,LENG J,ZHANG X M,et al. CAE finite element analysis and optimization design of chassis frame of rice harvester[J].Agricultural machinery,2021(1):91-97,101(in Chinese).
- [20] 李洪深,李十中,曹宝刚.转鼓式固体发酵罐支承结构设计及有限元分析[J].农业工程学报,2019,35(22):141-147.LI H S,LI S Z,CAO B G.Design of supporting system on rotary drum bioreactor for solid-state fermentation and finite element analysis[J].Transactions of the CSAE,2019,35(22):141-147(in Chinese with English abstract).
- [21] 刘董,李京慧,迟宗涛,等.基于模糊 PID 控制的控温箱设计[J].传感器与微系统,2021,40(3):73-76.LIU D,LI J H,CHI Z T,et al.Design of incubator based on fuzzy PID control[J].Transducer and microsystem technologies,2021,40(3):73-76(in Chinese with English abstract).
- [22] 李格伦.轮式移动机器人运动控制系统的设计[D].哈尔滨:东北农业大学,2017.LI G L.Design of motion and control system for the wheeled mobile robot[D].Harbin:Northeast Agricultural University,2017(in Chinese with English abstract).
- [23] 曾锦锋,陈晨,杨蒙爱.基于阿克曼转向原理的四轮转向机构设计[J].轻工机械,2013,31(3):13-16,19.ZENG J F,CHEN C,YANG M A.Design of four-wheel steering mechanism based on ackerman steering principle[J].Light industry machinery,2013,31(3):13-16,19(in Chinese with English abstract).
- [24] 孙景彬,楚国评,潘冠廷,等.遥控全向调平地履带拖拉机设计与性能试验[J].农业机械学报,2021,52(5):358-369.SUN J B,CHU G P,PAN G T,et al.Design and performance test of remote control omnidirectional leveling hillside crawler tractor[J].Transactions of the CSAM,2021,52(5):358-369(in Chinese with English abstract).
- [25] 耿泽栋,杨万能,李峰,等.基于机器视觉辣椒截面性状提取方法[J].中国农业科技导报,2021,23(2):105-114.GENG Z D,YANG W N,LI F,et al.Extraction of pepper section characteristics based on machine vision[J].Journal of agricultural science and technology,2021,23(2):105-114(in Chinese with English abstract).

English abstract).

- [26] 易诗,李俊杰,贾勇.基于红外热成像的夜间农田实时语义分割[J].农业工程学报,2020,36(18):174-180. YI S, LI J J, JIA Y. Real-time semantic segmentation of farmland at night using infrared thermal imaging[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(18):174-180(in Chinese with English abstract).

- [27] 戴国新,陈国兴,杨万能,等.基于高光谱的水稻精米品质参数测量技术研究[J].农业大数据学报,2019,1(2):51-63. DAI G X, CHEN G X, YANG W N, et al. Measurement technology of quality parameters of rice grain based on hyperspectral imaging on the visible-near infrared[J]. Journal of agricultural big data, 2019, 1(2):51-63(in Chinese with English abstract).

Design and experiment of a platform for detecting phenotype of field crop

LU Shaozhi^{1,2}, YANG Meng¹, YANG Wanneng^{1,2}, YE Junli¹, LI Weikun¹, SONG Peng¹

1. National Key Laboratory of Crop Genetic Improvement, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract An independently driven and steered four-wheel platform for detecting phenotype of field crop was designed to stably and effectively obtain phenotype information of field crop with high flexibility. It mainly consists of the walking system, the control system and the acquisition system of phenotype information. Creo software is used to design the structure of the platform and perform finite element simulation analysis under different working conditions of the main frame. A control system is developed with Siemens 1200 series PLC as the main controller to realize the platform's *in-situ* steering, lateral movement and Ackerman steering mode control. The four-wheel coordinated control method based on fuzzy PID was used to realize the synchronous movement of four-wheel. This platform can load RGB cameras, thermal infrared cameras, hyperspectral cameras and other sensors for phenotypic information collection according to the requirements of detection, and form a mobile darkroom during the collection process, effectively reduce the impact of the external environment on the effect of collecting phenotypic information. The results of field test showed that a single uninterrupted operation was up to 6 hours under full power. The results of four-wheel coordinated motion test showed that the maximum deviation rate of the wheel speed was 1%, and the average deviation rate of the platform driving straight on cement ground and in the field was 2.14% and 2.57%, with good mobile stability. When RGB and thermal infrared cameras were loaded for the acquisition of crop phenotypic information, 120 breeding plots in field were detected per hour. The RGB images of cotton under the non-dark room environment and the dark room environment in different time periods were collected separately and the leaf area was extracted. The results showed that the RGB images collected by the platform were more stable and reliable. The results of collecting and analyzing RGB images, thermal infrared and hyperspectral images under the dark room environment showed that the images collected by the platform had good quality and effective information.

Keywords field crops; phenotypic information; phenotypic detection; mobile darkroom; fuzzy control; crop information collection; image acquisition; crop breeding

(责任编辑:陆文昌)