doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S1.011

面向大田作物冠层信息采集的自走式轮式平台设计与试验

田永浩　刘　禹　张　硕　马　尧　翟志强　朱忠祥　杜岳峰
（中国农业大学工学院，北京 100083）

摘要：大田作物冠层包含丰富信息，可为开展作物表型和作物行感知方法研究提供数据资料。当前信息采集过程通常面临作物高度变化不均、不同生长期作物表现差异大等问题，对地面采集装备适应性和作业效率造成较大困难。为此，本文设计了一种具备轮距与地隙可调、人工遥控和自动导航双模控制功能的分布式电驱轮式平台。首先，分析典型大田作物的农艺性状，确定平台结构边界参数，开展整机构型设计。开发底盘控制系统，建立以STM32F103芯片为核心控制器的运动控制系统，支持前轮阿克曼转向、四轮阿克曼转向和原地转向等多种转向模式；构建以Xavier为决策控制器、GNSS/INS组合导航定位的导航控制系统。开展底盘运动性能试验，试验结果表明，所建平台直线对中性能稳定、转向灵活，对于遥控直线行驶试验，横向偏差平均值为0.019 m、标准差为0.017 m；航向偏差平均值为1.67°、标准差为1.03°；对于转向性能试验，前轮阿克曼转向平均精度为96.57%、四轮阿克曼转向平均精度为96.64%、原地转向平均偏移量为0.034 m。以玉米为代表性作物，开展作物冠层图像采集试验，验证所建平台的有效性，结果表明：所建平台能够自动跟踪规划路线进行对行行驶、地头换向、跨行对中等动作，完成冠层图像无损采集；对行行驶横向偏差平均值不大于0.052 m、标准差不大于0.029 m，航向偏差平均值不大于5.653°、标准差不大于3.843°。

关键词：轮式车辆；大田作物；分布式驱动；自动导航；对行作业
中图分类号：TP391　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2024)S1-0101-07

Design and Test of Self-propelled Wheeled Platform for Field Crop Canopy Information Collection

TIAN Yonghao　LIU Yu　ZHANG Shuo　MA Yao　ZHAI Zhiqiang　ZHU Zhongxiang　DU Yuefeng
(*College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: The field crop canopy contains a wealth of information that can provide important data for the study of crop phenotype and crop row perception methods. At present, the information collection process usually faces problems such as uneven crop height change and large differences in crop performance in different growth periods, which causes great difficulties to the adaptability and operation efficiency of ground acquisition equipment. Therefore, a distributed electric wheeled platform was designed with adjustable wheel base and ground clearance, manual remote control and automatic navigation dual-mode control. Firstly, the agronomic traits of typical field crops were analyzed, the boundary parameters of the platform structure were determined, and the whole structure design was carried out. The chassis control system was developed, a motion control system with STM32F103 chip as the core controller was established, which can support multiple steering modes such as front-wheel Ackerman steering, four-wheel Ackerman steering and in-place steering. A navigation control system with Xavier as the decision controller and GNSS/INS integrated navigation and positioning was constructed. The chassis motion performance test showed that the straight-line alignment performance of the built platform was stable and the steering was flexible, and the average lateral deviation was 0.019 m , the standard deviation was 0.017 m, the average heading deviation was 1.67° and standard deviation was 1.03°. For the steering performance test, the average steering accuracy of the front wheel Ackerman was 96.57%, the average steering accuracy of the four-wheel Ackerman was 96.64%, and the average deviation of in-situ steering was 0.034 m. Taking maize as a representative crop, the crop canopy image acquisition experiment was carried out to

收稿日期：2024－07－16　修回日期：2024－09－16
基金项目：国家自然科学基金项目(32101622)
作者简介：田永浩(2001—)，男，硕士生，主要从事农机装备环境感知技术研究，E-mail：tianyonghao010305@163.com
通信作者：翟志强(1989—)，男，副教授，博士生导师，主要从事农田信息感知与自主作业系统研究，E-mail：zhaizhiqiang@cau.edu.cn

verify the effectiveness of the built platform, and the results showed that the built platform could automatically track the planned route for row driving, ground head reversal, and cross-row alignment, and complete the non-destructive collection of canopy images. The average lateral deviation of the opposite driving was not more than 0.052 m, the standard deviation was not more than 0.029 m, the average value of the course deviation was not more than 5.653°, and the standard deviation was not more than 3.843°.

Key words: wheeled vehicles; field crops; inter-bank operations; automatic navigation; line operation

0 引言

大田作物冠层信息包含丰富的表观特征,是用于作物表型组学[1-4]和农机自主导航[5]等前沿技术研究的重要基础数据[6]。当前作物冠层信息采集装置主要有手持设备[7-8]、地面机器[9-10]和无人机[11]等。其中,地面机器可实现对作物冠层的精细化测量,包含固定轨道式[12-15]和移动车载式[16-19]。移动车载式平台转运灵活且成本较低,具有较好的应用前景。

由于种植模式差异,不同作物行距、株距差别大。同种作物在不同生长时期的冠层宽度、株高等农艺性状/差异也显著。为适应不同作物种植差异和同种作物生长差异,需要移动车载式平台具备轮距和地隙可调功能。YOUNG等[20]开发了以履带为底盘的田间采集平台TERRA-MEPP,面向于高粱作物,利用高度可调的装置来采集不同时期高粱株高等表型数据。JENSEN等[21]建立了履带式平台Armadillo,通过对履带模块的调节可以实现平台宽度和高度的调整。挪威生命科学大学提出了一种可重构、模块化移动农业平台Thorvald II[22],该平台解决了传统平台只能应用于单一环境的限制,利用各模块组合可应用于大田、温室等场景。XU等[23]提出了用于田间植物高通量表型信息采集的轮式平台MARS,该平台为高度模块化设计,由轮体模块、连接模块、控制模块和电源模块组成,通过对各模块重构组合,可以完成不同场景下的作业任务。汪小旦等[24]为适应水田行走和不同垄宽等复杂的农艺条件,设计了一种轮距宽度可调的高地隙四驱农田信息采集机器人。总体而言,现有大多数移动车载式平台[25-27]只针对于单一作物甚至是单一时期的作物场景,存在作物适应性不足、转向和机动性不足、作业过程人为干预过多等局限性。

本文立足于大田作物冠层信息采集需求,设计一种轮距和地隙可调、四驱四转的分布式电驱轮式平台(以下简称平台),以期实现多种作物种植行距和多个生育周期作物冠层信息自动采集。

1 平台构型设计

1.1 总体设计方案

以苗期至现蕾期前棉花、苗期至小喇叭口期玉米为大田作物典型代表,分析作物农艺性状,明确整机轮距、地隙等结构参数的边界区间。通过田间调查得到玉米种植行距为60~90 cm,小喇叭口期前玉米冠层平均高度小于80 cm、冠层平均宽度小于80 cm,棉花种植行距为70~90 cm,现蕾期前的棉花冠层平均高度小于40 cm、冠层平均宽度小于45 cm。设定平台作业方式为跨一行对行作业。确定整机参数如表1所示。

表1 平台设计参数

Tab. 1 Platform design parameters

参数	数值
基本外形尺寸(长×宽×高)/(cm×cm×cm)	120×82×95
整机质量/kg	180
轮距调节范围/cm	65~85
地隙调节范围/cm	60~80

综合考虑田间路况、作物生长和低噪减排等多方面因素,设计平台基本构型为分布式电驱轮式底盘,总体方案如图1所示。采用四轮独立驱动和四轮独立转向形式,基于电动推杆设计轮距和地隙调节机构,实现轮距和地隙无级调节。

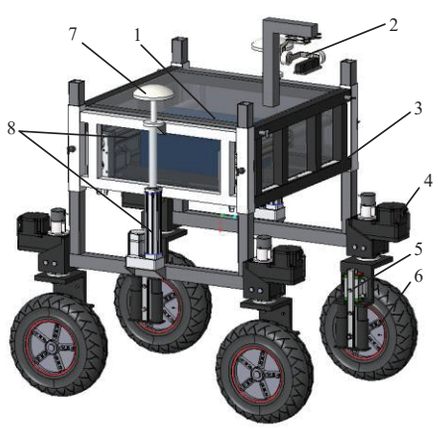


图1 平台总体设计方案

Fig. 1 Overall schematic of platform

1. 直流电源 2. 图像采集模块 3. 上装模块 4. 转向模块 5. 减振模块 6. 驱动模块 7. 组合导航模块 8. 轮距地隙调节模块

1.2 电驱底盘设计

底盘由车架和4个轮组构成。每个轮组结构包括驱动模块、转向模块和减振模块,如图2所示。转向模块中,转向电机额定转矩为43.5 N·m,与转向轴通过键连接传递扭矩,轴肩和锁紧螺母限制轴向位移。绝对值编码器安装在转向电机上方,通过连接联轴器与转向轴,实现转向角度反馈。减振模块中,滑块与导轨通过滚珠来配合移动,增加减振模块阻尼并限制减振支架上下移

动，螺旋弹簧在轴向移动时被压缩，实现减振功能。驱动模块通过导轨与减振模块连接，其中轮毂电机额定功率为500 W，安装于车轮内部，驱动转子旋转提供动力。

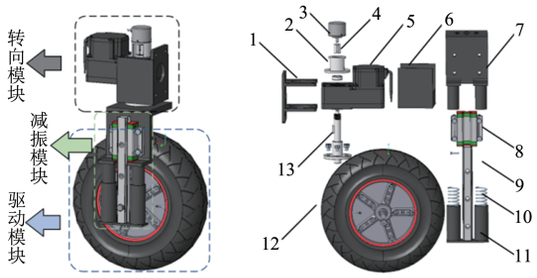


图2　轮组结构图

Fig. 2　Wheel structure diagram

1. 电机支架　2. 编码器底座　3. 绝对值编码器　4. 联轴器　5. 转向电机　6. 防尘挡板　7. 转向上支架　8. 滑块　9. 导轨　10. 减振弹簧　11. 转向下支架　12. 轮毂电机　13. 转向轴

1.3　上装平台设计

上装平台作为平台支撑骨架，结构如图3所示，通过上装模块搭载直流电源、图像采集模块、组合导航模块和轮距地隙调节模块。其中图像采集系统主要包括视觉传感器、三轴信息采集稳定器、上位机等，可实现作物图像采集功能。轮距地隙调节模块可实现平台在作物不同生长周期的跨行作业，结构如图4所示，采用电动推杆与伸缩套管技术，实现轮距地隙调节，并通过固定机架限位孔与锁紧螺母确保调节稳定性与精确度。

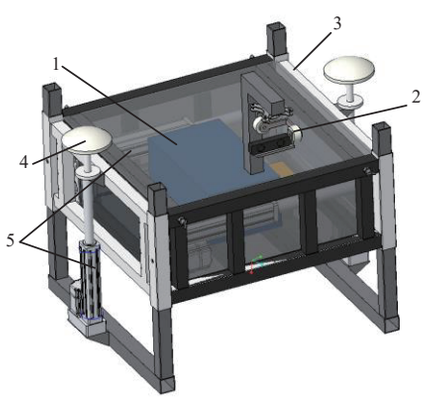


图3　上装平台结构图

Fig. 3　Structure diagram of bodywork module

1. 直流电源　2. 图像采集模块　3. 上装模块　4. 组合导航模块　5. 轮距地隙调节模块

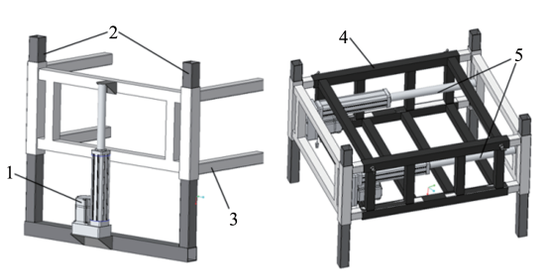


图4　轮距地隙调节模块结构图

Fig. 4　Structure diagram of wheel base clearance adjustment module

1. 地隙调节推杆　2. 导向立柱　3. 滑动机架　4. 固定机架　5. 轮距调节推杆

2　运动控制系统设计

2.1　底盘控制系统硬件设计

底盘控制系统总体框架如图5所示。硬件系统选用以STM32F103芯片为核心运动控制器，Xavier为决策控制器，进行平台控制系统开发。以运动控制器为核心的硬件系统主要包括：电源模块、无线接收模块、编码器、轮毂电机驱动器、转向电机驱动器和组合导航模块。

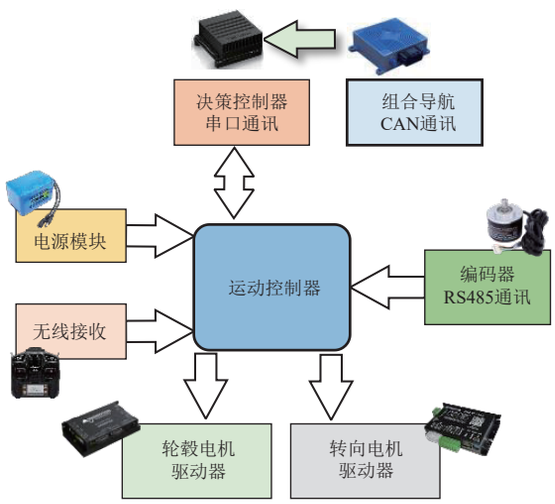


图5　底盘控制系统框架图

Fig. 5　Chassis control system frame diagram

决策控制器通过CAN总线接收来自GNSS/INS组合导航的平台位姿信息，经路径跟踪算法计算后将车速和车轮转角发送给运动控制器。无线接收模块选取射频信号为2.4 GHz的无线遥控器，包含遥控手柄和信号接收器，两者有效传输距离可达10 m，运动控制器可通过定时器捕获无线遥控模块的信号。运动控制器发送PWM信号至轮毂电机驱动器，动态调整PWM占空比实现轮毂电机控制，同时利用RS485接口接收编码器反馈的精确转角信号，经芯片计算后向转向电机驱动器发送转向信号，实现对转向电机精准控制。

2.2　运动控制软件设计

平台采用C语言基于Keil uVision5环境对运动控制器进行软件系统设计，Python基于Linux系统下的PyCharm环境对决策控制器进行软件系统设计。运动控制软件整体架构如图6所示，包括无线遥控模块、导航跟踪模块和底盘模块。无线遥控模块选用多通道航模遥控器，遥控器通过拨杆控制平台车速和车轮转角，并设有多个按键，用以切换不同转向形式。导航跟踪模块结合GNSS/INS组合导航系统，根据作业环境进行路径规划，决策控制器实时获取平台位姿信息，通过纯跟踪算法确定转向方式，计算车速和转向角，通过串口发送给底盘模块。底盘模块对信号解析后确定控制方式，通过驱动器实现对目标转角和平台行驶速度控制。

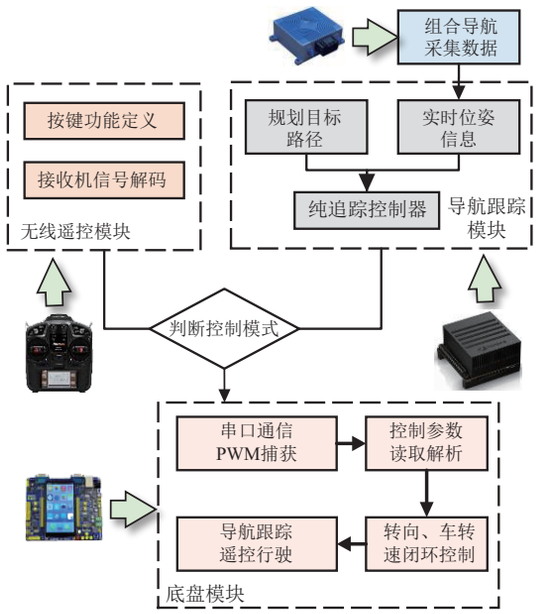


图6 软件设计架构图

Fig. 6 Software design architecture diagram

3 试验与结果分析

3.1 底盘运动性能试验

3.1.1 直线行驶试验

为验证平台在直线行驶过程中的对中性，设定一段长7 m的水泥硬路面，利用平台搭载的组合导航对直线路径起始点和终点经纬度信息进行记录，记录完成后将平台放置于起始点，以速度0.5 m/s遥控驾驶，重复3组试验。试验过程中实时记录平台的定位信息和航向角，并采用UTM投影的方法将经纬度信息与参考直线路径转换到平面直角坐标系下，计算出平台运动轨迹与拟合直线的偏差。如图7所示，分别为行驶轨迹和航向轨迹，由试验数据结果可知，平台在遥控直线行驶的条件下，平均横向偏差为0.019 m，横向偏差标准差为0.017 m；平均航向偏差为1.67°，航向标准差为1.03°。表明平台对中性较好，满足行驶要求。

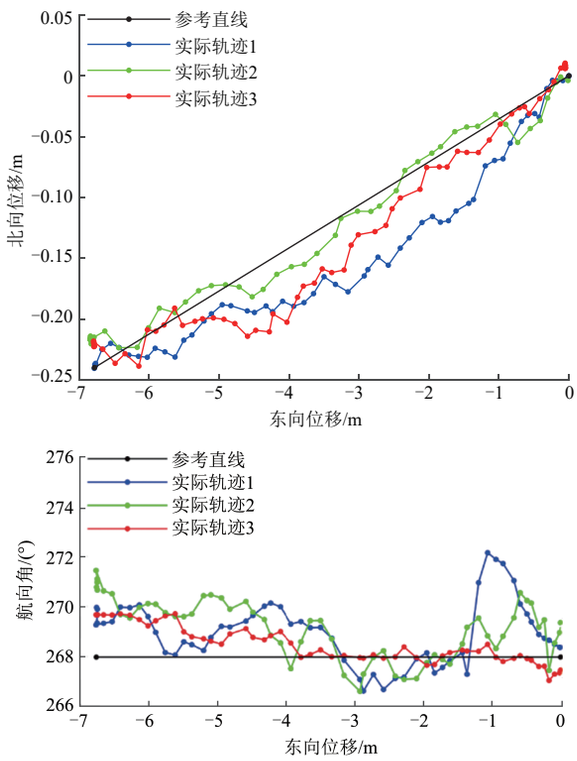
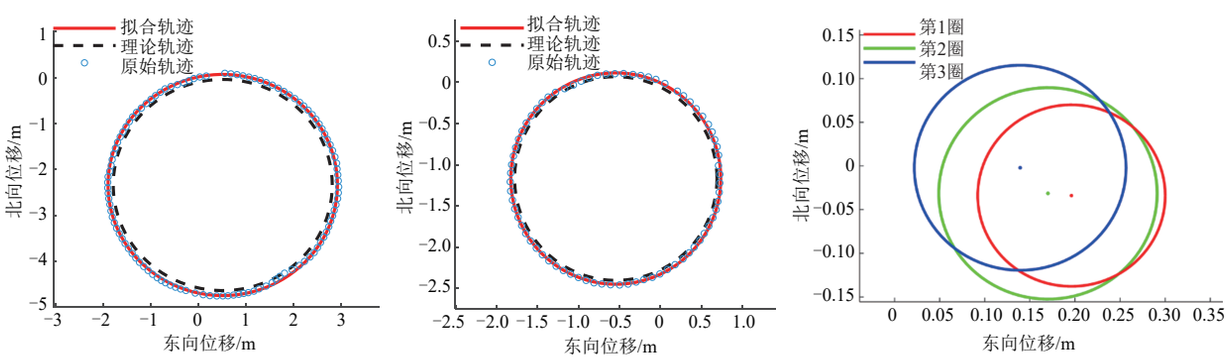


图7 直线行驶试验

Fig. 7 Straight-line driving test

3.1.2 转向行驶试验

平台具有四轮独立转向的功能，为验证平台转向行驶的灵活性和可靠性，设定水泥硬地面进行前轮阿克曼转向、四轮阿克曼转向运动试验。如图8所示，分别是内侧转角极限位置为25°的前轮阿克曼转向试验、四轮阿克曼转向试验，以及绕质心原地转向试验的转向轨迹，其中黑色虚线表示在该转角下的理论半径。



(a) 25°前轮阿克曼转向 (b) 25°四轮阿克曼转向 (c) 原地转向

图8 转向行驶轨迹示意图

Fig. 8 Schematics of steering trajectory

在前轮阿克曼转向、四轮阿克曼转向试验中，使用无线遥控器将平台前轮转到软件设置的极限位置，以一定的速度左转向行驶形成完整的圆周运动轨迹，利用组合导航测取平台的转向运动轨迹，并与质心位置理论转向半径进行对比。试验选取前轮内侧转角极限位置为15°、25°、35°，各进行3组转向试验，取平均值作为对应

转角下的实际半径，定义转向精度为理论最小半径与实际半径比值。前轮阿克曼转向试验结果如表2所示。由表2可得，平台在内侧车轮转角为15°、25°、35°的平均精度为96.57%。四轮阿克曼转向试验结果如表3所示，平台在内侧车轮转角为15°、25°、35°的平均精度为96.64%。试验结果表明，平台转向灵活，满足作业要求。

表 2　前轮阿克曼转向试验结果

Tab. 2　Front-wheel Ackermann steering test data

转向角/(°)	理论半径/m	实际半径/m	转向精度/%	平均精度/%
15	3.20	3.34	95.81	
25	2.30	2.39	96.20	96.57
35	1.71	1.75	97.70	

表3　四轮阿克曼转向试验结果

Tab. 3　Four-wheel Ackerman steering test data

转向角/(°)	理论半径/m	实际半径/m	转向精度/%	平均精度/%
15	1.93	2.03	95.07	
25	1.24	1.28	96.88	96.64
35	0.97	0.99	97.98	

在原地转向模式下，平台各轮垂线相交于质心位置，并围绕质心做原地回转运动。为验证平台在回转时的车轮同辙性，设定水泥硬地面进行原地转向试验，试验进行连续3圈回转运动，利用组合导航测量转向中心偏移量，因为组合导航安装位置与质心有一定的偏移距离，因此在做原地转向运动时，组合导航测得的平台运动轨迹为圆形，如图8c所示。相邻轨迹圆心位置偏移量作为平台原地转向的性指标，偏移量分别为0.026、0.042 m，平均偏移量为0.034 m，具有良好的原地转向同辙性，满足原地转向设计要求。

3.2　田间试验

选择玉米苗期为典型作物代表、冠层图像采集为信息采集任务，于2024年7月在中国农业大学上庄实验站玉米大田开展田间试验，验证所建平台的有效性。平台行驶方案如图9所示，平台跨行行驶策略是基于前轮阿克曼转向的直线行驶和原地转向的结合，整个路径由3段直线组成，平台按照行驶方向运动，在换行点处，改变运动模式，前轮阿克曼转向模式转换与原地转向模型相互切换。

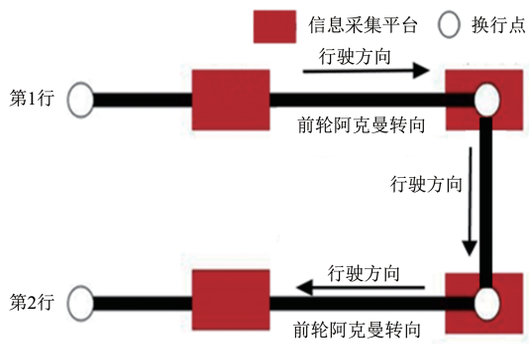


图9　跨行作业策略示意图

Fig. 9　Schematic of inter-bank operation strategy

平台跨相邻行作物试验设定2段长均为8.5 m作物行和0.85 m跨行地头段，跟踪轨迹如图10a所示，试验开始时将平台质心位置置于规划路线起点右侧0.1 m处，并设置在规划路径终点前2 m的位置停止运动，平台位置1为换行点，此处平台转换为原地转向运动模式，试验场景如图10b所示。平台位置2为换行后相邻行轨迹某一位置，如图10c所示。



(a) 跟踪轨迹　　(b) 平台位置1　　(c) 平台位置2

图10　跨相邻行作物跟踪示意图

Fig. 10　Schematics of crop tracking across adjacent rows

试验开始时，平台未置于规划路径上，所以开始阶段会出现较大横向偏差和航向偏差，且由于地形不平导致平台滑移，产生瞬间较大偏差，如图11所示。由图11可得，第1段对行行驶横向偏差平均值为0.052 m，标准差为0.029 m，航向偏差平均值为4.976°，标准差为3.843°，具有较好的跟踪效果。

平台跨3行作物试验设定两段长均为26 m作物行和2 m跨行地头段，跟踪轨迹如图12a所示，设置在规划路径终点前1 m处停止运动。在跟踪过程中，地面不平易引起平台车轮悬空导致行驶出现较大偏差，如图12b、12c所示，易出现瞬间较大偏差。由试验结果可得第1段对行行驶横向偏差平均值为0.018 m，标准差为0.011 m，航向偏差平均值为3.343°，标准差为2.527°，具有较好的跟踪效果。

平台跨5行作物试验设定两段长为9、7 m的作物行和3.3 m跨行地头段，跟踪轨迹如图13a所示，设置在规划路径终点前1 m处停止运动。在跟踪过程中，平台车轮会

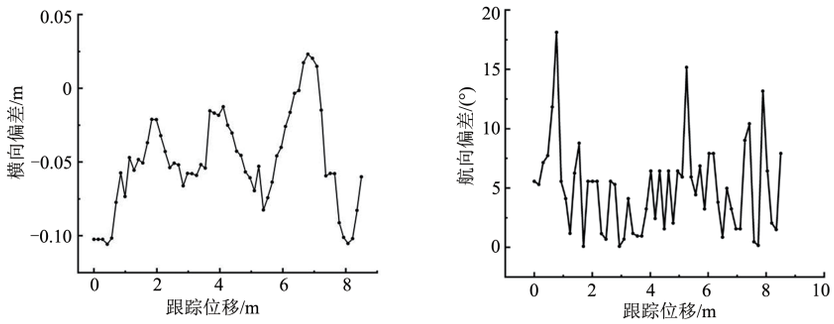


图11 跨相邻行作物试验数据示意图

Fig. 11 Schematics of crop test data across adjacent rows

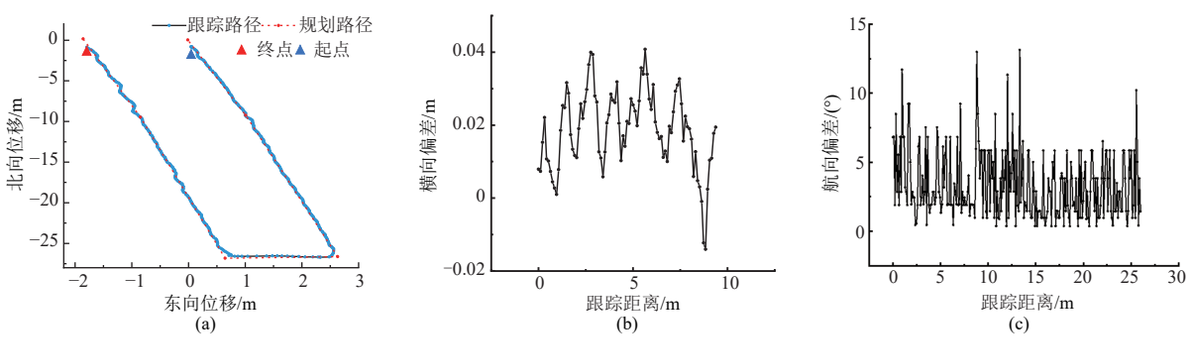


图12 跨3行作物数据示意图

Fig. 12 Schematics of crop data across three rows

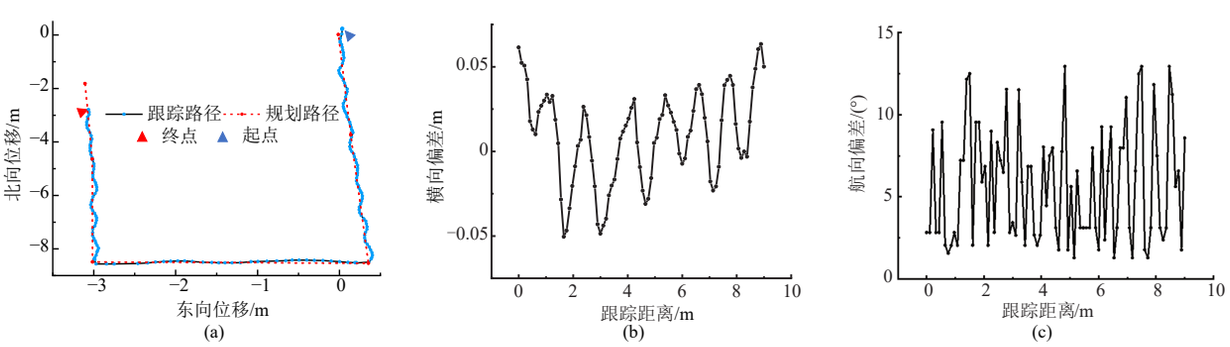


图13 跨5行作物数据示意图

Fig. 13 Schematics of crop data across five rows

因土壤松软陷入，造成滑转现象，如图13b、13c所示，易出现瞬间较大偏差值。由试验数据可得第1段对行行驶横向偏差平均值为0.024 m，标准差为0.016 m，航向偏差平均值为5.653°，标准差为3.569°，具有较好的跟踪效果。

4 结论

（1）面向玉米和棉花等大田作物冠层信息采集场景，设计了一种轮距、地隙可调，四驱四转的轮式移动平台。平台具备多种转向模式、人工遥控和自动导航双模控制功能，轮距调节范围为0.65~0.85 m、地隙调节范围为0.6~0.8 m。

（2）以玉米为代表性作物，开展作物冠层图像采集试验。试验结果表明，所建平台能够自动跟踪规划路线进行对行行驶、地头换向、跨行对中等动作，可实现最小跨一行作业，不会压苗伤苗，完成作物冠层图像无损采集。

（3）田间地面起伏较大时会造成平台出现滑移和滑转现象，导致行驶轨迹与规划路线偏差变大。后续可改进悬架构型或运动控制策略，进一步提高平台通过能力。

参 考 文 献

[1] AUGUSTINA U A, IWUNOR O P, IJEOMA O R. Heritability and character correlation among some rice genotypes for yield and yield components [J]. Journal of Plant Breeding Genetics and Genetics, 2013(1): 73 - 84.

[2] HAIRMANSIS A, KUSTIANTO B, SUWARNO S. Correlation analysis of agronomic characters and grain yield of rice for tidal swamp areas [J]. Indonesian Journal of Agricultural Science, 2010, 11(1): 11 - 15.

[3] KIANI G. Character association and path coefficient analysis of yield components in rice varieties [J]. Research on Crops, 2012, 13: 552 - 555.

[4] RASHID K, KHALIQ E, FAROOQ O, et al. Correlation and cluster analysis of some yield and yield related traits in rice (*Oryza sativa*) [J]. Journal of Recent Advances In Agriculture, 2014(2): 290 - 295.

[5] 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 Yuhan, 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)

[6] 张慧春, 周宏平, 郑加强, 等. 植物表型平台与图像分析技术研究进展与展望 [J]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 1 - 17.
ZHANG Huichun, ZHOU Hongping, ZHENG Jiaqiang, et al. Research progress and prospect in plant phenotyping platform and image analysis technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 1 - 17. (in Chinese)

[7] 程曼, 袁洪波, 蔡振江, 等. 田间作物高通量表型信息获取与分析技术研究进展 [J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1): 314 - 324.
CHENG Man, YUAN Hongbo, CAI Zhenjiang, et al. Review of field-based information acquisition and analysis of high-throughput phenotyping [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp.1): 314 - 324. (in Chinese)

[8] 张慧春, 王国苏, 边黎明, 等. 基于光学相机的植物表型测量系统与时序生长模型研究 [J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 197 - 207.
ZHANG Huichun, WANG Guosu, BIAN Liming, et al. Visible camera-based 3D phenotype measurement system and time-series visual growth model of plant [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 197 - 207. (in Chinese)

[9] ZHOU J, REYNOLDS D, WEBSDALE D, et al. CropQuant: an automated and scalable field phenotyping platform for crop monitoring and trait measurements to facilitate breeding and digital agriculture [J]. BioRxiv, http://dot.org/10.1101/161547, 2017.

[10] DANIEL R, JOSHUA B, ALAN B, et al. CropSight: a scalable and open-source information management system for distributed plant phenotyping and IoT-based crop management [J]. Gigascience, 2019 8(3):giz009.

[11] 刘建刚, 赵春江, 杨贵军, 等. 无人机遥感解析田间作物表型信息研究进展 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 98 - 106.
LIU Jiangang, ZHAO Chunjiang, YANG Guijun, et al. Review of field-based phenotyping by unmanned aerial vehicle remote sensing platform [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(24): 98 - 106. (in Chinese)

[12] NICOLAS V, KASRA S, POURIA S T, et al. Field scanalyzer: an automated robotic field phenotyping platform for detailed crop monitoring [J]. Functional Plant Biology, 2016, 44(1): 143 - 153.

[13] WHITE J W, ANDRADE-SANCHEZ P, GORE M A, et al. Field-based phenomics for plant genetics research [J]. Field Crops Research, 2012, 133: 101 - 112.

[14] LEI W, FANGDONG L, XIAOSHUAI H, et al. Identification of the qtlallele system underlying two high-throughput physiological traits in the chinese soybean germplasm population [J]. Frontiers in Genetics, 2021, 12: 600444.

[15] VINCENT V, JANA K, GREGOIRE H, et al. LeasyScan: a novel concept combining 3D imaging and lysimetry for high-throughput phenotyping of traits controlling plant water budget [J]. Journal of Experimental Botany, 2015, 66(18): 5581 - 5593.

[16] BAO Y, TANG L. Field-based robotic phenotyping for sorghum biomass yield component traits characterization using stereo vision [J]. IFAC PapersOnLine, 2016, 49(16): 265 - 270.

[17] 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 upland cotton [J]. Remote Sensing, 2019, 11(6): 700.

[18] BUSEMEYER L, MENTRUP D, MOLLER K, et al. BreedVision - a multi-sensor platform for non-destructive field-based phenotyping in plant breeding [J]. Sensors, 2013, 13(3): 2830 - 2847.

[19] 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, 2014, 41(1): 68 - 79.

[20] YOUNG S N, KAYACAN E, PESCHEL 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.

[21] JENSEN K, NIELSEN S H, JOERGENSEN R, et al. A low cost, modular robotics tool carrier for precision agriculture research [C]// Proceedings of the Proc. Int. Confon. Precision Agriculture, 2012.

[22] GRIMSTAD L, FROMP J. THORVALD II - a modular and re-configurable agricultural robot [C] //Proceedings of the 20th World Congress of the International-federation-of-automatic-control (IFAC), 2017.

[23] XU Rui, LI Changying. A modular agricultural robotic system (MARS) for precision farming: concept and implementation[J]. Journal of Field Robotics, 2022, 39(4): 387 - 409.

[24] 汪小旦, 李泽晟, 陈彦宇, 等. 高地隙农田信息采集机器人设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2023, 54(6): 65 - 77.
WANG Xiaochan, LI Zesheng, CHEN Yanyu, et al. Design and experiment of farmland information collection robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(6): 65 - 77. (in Chinese)

[25] SHAFIEKHANI A, KADAM S, FRITSCHI F B, et al. Vinobot and vinoculer: two robotic platforms for high-throughput field phenotyping [J]. Sensors, 2017, 17(1): 214 - 236.

[26] CUBERO S, MARCO-NOALES E, ALEIXOS N, et al. RobHortic: a field robot to detect pests and diseases in horticultural crops by proximal sensing [J]. Agriculture-Basel, 2020, 10(7): 276 - 288.

[27] CHEBROLU N, LOTTES P, SCHAEFER A, et al. Agricultural robot dataset for plant classification, localization and mapping on sugar beet fields [J]. International Journal of Robotics Research, 2017, 36(10): 1045 - 1052.