

植物表型平台与图像分析技术研究进展与展望

张慧春^{1,2} 周宏平¹ 郑加强¹ 葛玉峰² 李杨先¹

(1. 南京林业大学机械电子工程学院, 南京 210037; 2. 内布拉斯加大学林肯分校生物系统工程学院, 林肯 NE 68583)

摘要: 近年来,植物基因组得到迅猛发展,但因缺乏足够的表型数据而限制了人类解析数量性状遗传学的能力。通过开发植物表型信息采集平台和进行图像分析可以加以解决。高通量、自动化、高分辨率的植物表型信息采集平台与分析技术对于加快植物改良和育种、提高产量和抗病虫害能力至关重要。将植物表型平台信息采集平台与分析技术用于解析基因组信息,定量研究与生长、产量和适应生物或非生物胁迫相关的复杂性状,是建立植物生长模型和采集农作物高维、丰富表型数据集的重要途径,能够满足填补基因组信息与植物表型可塑性之间空白的需要。阐述了基于光学成像的植物表型信息采集平台与图像分析技术的研究进展,从室内、田间不同的使用环境出发,根据不同搭载方式,总结分析了各表型平台的功能和特点。最后,分析了目前植物表型信息采集平台与分析技术存在的瓶颈问题,提出了以下建议与展望:开发植物表型信息采集平台的多传感器集成系统;将植物生长环境监测模块融入植物表型信息采集平台中;开发针对林木的表型信息采集平台;对传感器获取的表型数据进行更好的集成与挖掘;采用无损原位根系信息采集技术得到植物地下部分的表型数据;构建表型数据统一开放的标准,进行学科交叉的深度合作。

关键词: 植物表型; 表型平台; 高通量; 光学成像; 图像采集; 图像分析技术

中图分类号: TP391.41; TP212 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)03-0001-17

OSID:



Research Progress and Prospect in Plant Phenotyping Platform and Image Analysis Technology

ZHANG Huichun^{1,2} ZHOU Hongping¹ ZHENG Jiaqiang¹ GE Yufeng² LI Yangxian¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

2. Biological Systems Engineering Department, University of Nebraska-Lincoln, Lincoln NE 68583, USA)

Abstract: In recent years, the rapid development of plant genomes, but the lack of sufficient phenotypic data limits the ability of humans to analyze the genetics of quantitative traits. This problem can be effectively solved by developing a plant phenotypic monitoring platform. High-throughput, automated and high-resolution phenotyping platform is critical for accelerating crop improvement and breeding strategies for higher yield and disease tolerance. Plant phenotyping has been advancing at an accelerated rate as a response to the need to fill the gap between genomic information and the plasticity of the plant phenome. Domestic and international efforts have been made to develop phenotyping facilities, and these devices are actively contributing to the generation of high-dimensional, richly informative datasets about the phenotype of model and crop plants. The plant phenotypic monitoring platform integrates multiple sensors for quantitative research on complex traits related to growth, yield, and adaptation to biotic or abiotic stresses such as plant height, leaf number and area, root morphology, biomass, and fruit characteristics. The research progress of plant phenotypic monitoring technology and research status of platform at home and abroad was mainly introduced. The research progress of plant phenotypic information collection platform and technology was introduced, and the functions and characteristics of each were summarized and analyzed. Thus, various phenotypic platform based on indoor and field environments were presented together with applications of these platforms with different mounting modes. An overview of the most

收稿日期: 2019-09-23 修回日期: 2019-10-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(31371963)、江苏省六大人才高峰项目(NY-058)、江苏省青蓝工程项目(苏教201842)、江苏省333工程项目(苏人20186)、福建省林木种苗科技攻关六期项目(20192021)和江苏高校优势学科建设工程项目

作者简介: 张慧春(1978—),女,教授,博士,主要从事农林信息技术与装备、表型分析平台与技术研究,E-mail: njzhanghc@hotmail.com

commonly used sensors that empower digital phenotyping and the information they provide were presented. Function and feature of each phenotype platform was also analyzed. Meanwhile, an in-depth analysis of image processing with its major issues was given, and the algorithms that were used or emerged as useful to obtain data out of images in an automatic fashion. In this review, the current and emerging methods of image acquisition and processing that allow image-based phenomics were covered. The main bottlenecks that still remained in the field was concluded and the application prospect of plant phenotypic monitoring technology and platform were expected, which pointed out the following challenges: developing plant phenotyping platform of multi-sensor integrated system, introducing plant growth environment monitoring module into plant phenotypic information collection platform, designing forest phenotypic information collection platform, conducting integration and mining phenotype data captured by sensors, collecting the phenotypic data of underground part by nondestructive in situ plant root measurement technology, building unified open standards for phenotypic data and prompting interdisciplinary cooperation.

Key words: plant phenotype; phenotyping platform; high-throughput; optical imaging; image acquisition; image analysis technique

0 引言

高通量测序技术的快速发展提供了经济和高效的基因组信息,极大地加速了对调控作物重要性状基因的挖掘。然而,由于植物表型的复杂性、受环境影响多变及全程动态变化等特性,表型研究严重滞后于基因型研究,造成植物信息之间无法互联互通,也使海量的基因数据的科研价值降低^[1]。只有将大量可用的基因型信息与表型性状相匹配,架设起数据之间沟通的桥梁,才能充分挖掘基因组、转录组和蛋白质组等组学信息,揭示特征多样性随时间变化的趋势。基于光学成像的表型采集平台和图像分析技术是当前植物表型测定的主要瓶颈,由于受限于平台与技术,缺乏足够数量与精度的表型数据,限制了解析植物生长速率、产量和适应压力相关基因的能力。表型采集与分析技术结合基因组信息,可培育出更高产、更优质、更耐胁迫的作物,从而大大提高育种改良效率^[2]。

作物收获的是表型,而不是基因型。表型是指受基因和环境决定或影响的复杂植物性状,包括生长、发育、耐性、抗性、生理、结构、产量等^[3]。可测量参数包括植物高度、叶形态(如叶片长度、叶片宽度、叶片数量、叶面积、叶面倾角、叶空间分布等)^[4-5]、根形态(如根长度、根的数量等)^[6]、生物量(指某一时刻单位面积内实存生活的有机物质总量)^[7]、果实特征(如果实大小、果实形状、果实颜色等)及生物胁迫(包括病害、虫害、杂草危害等)^[8]与非生物胁迫(包括干旱、盐碱、洪涝等)^[9-10]等。

早在DNA和分子标记被发现之前,人们就已经根据表型对品种进行选择、确定和改良,依靠肉眼观察进行表型评估,将田间小块作物的长势、倒伏和衰老等作为判断依据。植物表型信息采集技术是农业

生产领域的重大革新,通过这项技术,可以快速获取植物的结构、形态、生长、光合作用等特征,客观准确地得到各项表型数据,对生物体进行从宏观到微观的系统展示,监测作物生长状况,从而有利于培育出更优良的品种,为调控作物生长环境提供可靠依据,也为农作物优质丰产研究提供新的方法。

本文从应用环境的室内和田间角度,汇总当前国内外的各种类型表型平台,分析其原理构成、获取的表型参数和优势特点,阐述面向植物表型信息采集的图像采集技术和图像数据分析算法,对采集植物表型图像的分析 and 处理方法、流程加以总结,对根据提取的性状参数进行作物产量预测、制定相应的栽培管理措施等智能决策应用进行分析,并对未来植物表型信息采集技术和平台的发展进行展望。

1 植物表型信息采集平台研究进展

传统的植物表型信息采集方法存在样本量小(测量性状少)、效率低(多为人工测量)、误差大(主观性严重)、适应性差(多针对单一植物)等缺点^[11],无法适应大批量、快速、准确、无损的表型测量要求,已成为制约植物生物学研究的重要因素^[12]。随着科研需求的增长及成像传感器技术的发展,进行高通量、高效率、高精度、低误差、低成本的自动表型信息采集已成为可能。成像传感器监测的数据具有客观性,且可以对植物进行实时监测与分析,因此自动表型信息采集技术开始广泛用于植物表型信息采集平台^[13-15]。植物表型信息采集平台的应用需要以下条件:高分辨率的成像传感器;能进行数据自动采集的高精度环境传感器;有利于进行计算机视觉、机器学习等处理的优质数据;数据管理和分析技术^[16-20]。

随着现代化、智能化农业装备的发展,学者们希

望在大批量植株中挖掘物种功能多样性、比较品种性能及植株对环境的响应,以获取表型性状之间的关联,基因、环境与表型之间的关系等,高通量植物表型信息采集平台应运而生^[21-24]。高通量(HTTP)指的是与人工表型分析相比,能够测量更多样品和/或更多数据点,不仅在单位时间内采样数量高,同时数据处理和参数获取的同步性和高效性也与硬件平台扫描源数据相匹配。高通量表型依赖于快速输送、自动化传感、数据采集、数据分析方法和技术装备,通过在平台(包括拖拉机、机器人、无人机、固定轨道、传送带、悬索缆架等)搭载多种传感器,如电

荷耦合器件(Charge coupled device,CCD)相机、近红外仪(Near infrared,NIR)、红外仪(Infrared,IR)、热成像仪、光谱成像仪、荧光成像仪等对室内、田间的植物进行监测,从而在短时间内获取较多的表型参数^[25]。由于植物表型信息采集技术在农业领域存在巨大潜力,各国的科研机构与企业都在积极开发构建高通量植物表型信息采集平台^[26]。

植物表型采集平台按照搭载方式可分为台式、传送带式、车载式、自走式、门架式、悬索式以及无人机式植物表型平台,表 1 列举对比了部分表型信息采集平台性能。

表 1 植物表型信息采集平台性能对比

Tab.1 Performance comparison of plant phenotyping platform

表型平台	研发单位	平台类型	使用环境	功能优势	实际应用
HRPF	华中农业大学和 华中科技大学	传送带式高通量表型平台	室内	作物表型参数全自动、无损、高通量提取,以及植物栽培输送全自动一体化	2011 年已由华中农业大学和华中科技大学使用 ^[27-29]
LiAir	北京数字绿土科技有限公司	无人机植物表型平台	田间	视野广阔,日测 2 km ² ,累计工作时长超 8 000 h	2012 年开始应用于农林业表型领域
FieldScan	荷兰 Pheno Spex 公司	门架式植物表型平台	田间、室内	不受环境影响,效率达 5 000 株/h,每天可重复测量	2018 年应用于南京农业大学搭建的田间表型平台
Crop 3D	中国科学院植物研究所	台式表型平台	室内	集成激光雷达、相机、多光谱和热成像仪 4 种传感器	2014 年开始应用于中国科学院植物研究所 ^[30]
Spidercam	美国内布拉斯加大学林肯分校	悬索式高通量表型平台	田间	覆盖 4 000 m ² 的田间,悬索平台上搭载有可见 RGB、近红外线、激光雷达和多光谱等多个摄像头和传感器	2017 年在内布拉斯加大学林肯分校的试验田间已经使用 ^[31]
Ppes	法国农业科学研究院	台式表型平台	室内	在生长箱内可控条件下,记录微气象条件,配备垂直和水平架设的两架 RGB 摄像机、红外摄像机和荧光摄像机,并能进行自动浇水	2006 年在法国农业科学研究院的生长箱内已经使用 ^[32]
Scanalyzer H T S	德国 LemnaTec 公司	台式高通量表型平台	室内	在生长箱中配备了一个机械臂,可以容纳 3 个高分辨率的相机,在可见光、荧光和近红外光谱上成像	2017 年在美国阿肯色州立大学的生长箱使用 ^[33]
PhenotypingRobot	美国爱荷华州立大学	自走式表型平台	田间	多个立体摄像头同步触发,多组立体镜头叠加确保对高大作物的表型分析	2014 年在美国爱荷华州立大学的试验田间使用
GPhenoVision	美国乔治亚大学	车载式植物表型平台	田间	可基于现有机器搭载,成本较低,较高通量	2017 年在美国乔治亚大学的棉田中使用 ^[34]
Helipod	澳大利亚联邦科学与工业研究组织	无人机植物表型平台	田间	搭载热成像仪和 RGB 相机,获取冠层温度和 RGB 图像	在澳大利亚堪培拉州进行高强度表型实验
CropObserver	荷兰 PhenoVation 公司	传送带式表型平台	田间、温室	实时测量光和效率,估算植物叶片对土壤覆盖度	在荷兰瓦赫宁根大学试验田中进行实验
WPScan	荷兰 WPS 公司	传送带式表型平台	室内	超高通量,每天数万盆植物,不受恶劣温室环境限制,效率高	为 CropDesign、英美烟草等 110 多家大型园艺公司建造的平台
TuberCT	德国 Fraunhofer EZRT	传送带式植物表型平台	室内	断层扫描,扫描后完成 3D 重建	直径 200 μm 以上根系的高通量 CT 扫描
Grow Screen Agar	德国生物与地球科学研究所	传送带式植物表型平台	室内	可测量植物的根长度,以及主根与分支的侧根角度	利用高分辨率相机采集种植在琼脂培养皿中植株的根图像
DroughtSpotter	荷兰 Pheno Spex 公司	传送带式植物表型平台	室内	精确灌溉功能,评估植物的蒸腾动态	2015 年在阿德莱德大学进行干旱胁迫实验 ^[35]

植物表型信息采集平台按照使用环境分为温室植物表型平台和田间植物表型平台。室内容易控制气象环境,包括气候箱、生长室、温室等,方便开展不同水分、光照、养分、温湿度等对植物的影响以及植物对生物和非生物胁迫反应的研究^[36-37],实验可重复性好,有助于完成基因定位和机理分析。

1.1 面向温室的植物表型平台

1.1.1 台式植物表型平台

台式植物表型平台是一种专门针对小型植物、小批量采样的系统,通常以气候生长箱为依托,用于实验室中。可选择可见光、近红外、红外或荧光成像摄像头中的一种或多种,一般采用摄像头固定、植物运动的方式进行成像。由于没有传送装置,只能间接进行植物运动测量(必须手工更换样品)。图1为荷兰的台式多光谱植物表型信息采集平台 PlantMonitor。该平台包括一个可见光相机和一个荧光相机,通过可见光相机可获取植物在 *R*、*G*、*B*(红、绿、蓝)通道下的图像,这些图像可独立使用,也可以自动合成高分辨率的可见光图像用于分析。荧光相机可用于叶绿素荧光成像,由于除植物之外包括花盆、土壤等在内的其他部分都不含有叶绿素,因此叶绿素荧光成像直接去除了花盆、土壤等背景噪声,达到图像分割的目的。此外,对于拟南芥等冠层平展的小型植物,可以自动进行叶片计数。



图1 台式多光谱植物表型信息采集系统 PlantMonitor
Fig.1 Benchtop multispectral plant phenotype measurement system PlantMonitor

LemnaTec 的台式扫描分析表型信息采集平台是一种多功能成像分析系统(图2),它专为低成本的植物表型分析和小型生物的表型参数提取而设计^[38]。在平台中,一个 RGB 传感器安装在顶部,下方有光源,底部也有可用照明。样品需经手工装载,该平台主要用于花盆植物、小托盘里的植物、培养皿中的植物(如种子、叶盘)、烧杯中的植物(如浮萍)、植物的部分片段(如树叶、水果)等样品的表型信息采集。测量的参数包括尺寸、颜色等信息,这种台式扫描分析表型信息采集系统对表型参数测试准确性高、可重复性强,对于研究植物生长过程中植物对环

境胁迫的表型响应、萌发试验或生态毒理测试效果较好。



图2 LemnaTec 的台式扫描分析表型信息采集系统
Fig.2 Lab scanning analysis phenotype measurement system by LemnaTec

中国科学院联合其它机构研发了高通量植物监测平台——Crop 3D^[39](图3),该平台以激光雷达为主,并集成高分辨率相机、热成像仪、高光谱成像仪等传感器。Crop 3D 高通量植物监测平台对田间或温室作物的各生长时期进行多源数据获取,结合自主开发的软件,可提取株高、株幅、叶长、叶宽、叶倾角和叶面积等表型参数。

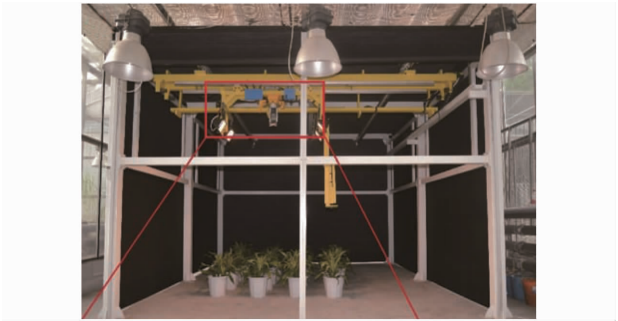


图3 高通量植物监测平台 Crop 3D
Fig.3 Crop 3D platform for 3D high-throughput crop phenotyping

美国阿拉斯加大学台式表型信息采集系统主要针对小型植物,如图4所示^[40],能自动进行高通量测试。该生长箱除了可以精确控制温度、湿度、光照强度外,还在轨道上安装了可见光相机、荧光成像仪和近红外成像仪来定时采集植物图像。需要手动检查托盘的目标质量,用水分测量仪来测试土壤水分数据。当叶片足够大时,还可测定植物的光合作用效率。

1.1.2 传送带式植物表型平台

传送带式植物表型平台是在温室内将各类成像装置和传感器固定,盆栽植物装在与牵引件连结在一起的承载构件内,或直接装在输送带上,利用工作构件的旋转运动或往复运动,使盆栽植物向前输送,运动到有成像装置的暗箱或传感器处,进行表型数据的采集,采集完成后继续移动,形成闭环回路。

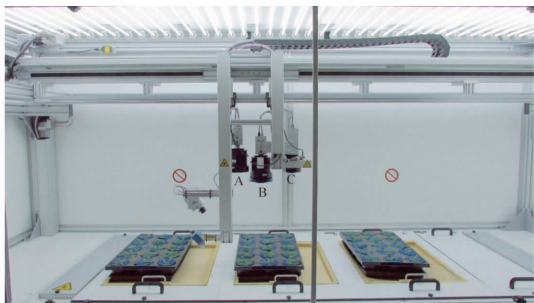


图 4 针对小型植物的自动高通量台式表型信息采集系统

Fig. 4 Automated high-throughput phenotyping system for small plants

A. 可见光相机 B. 荧光成像仪 C. 近红外成像仪

图 5 为荷兰 WPS 公司的温室植物表型平台,该平台通过传送带将植物传送到指定成像模块,并依次对植物进行成像。对成像后的植物进行参数提取,从而获取植物生长状况。由于所有植物都采用条形码进行标记,其各个生长阶段的所有表型数据都可定期、自动进行监测,适用于盆栽、小型作物。荷兰 Ovata 应用这种温室高通量植物表型平台实现了多肉植物从播种、灌溉、施肥到清洗苗床等过程的全自动作业。



图 5 WPS 公司的传送带式温室植物表型平台

Fig. 5 WPS greenhouse phenotyping platform

美国内布拉斯加大学林肯分校建立了传送带式温室高通量植物表型平台(图 6)^[41],可实现对最高 4 m 的玉米、高粱等高大作物的表型信息提取,传送带输送系统将植物自动送入 RGB、近红外、热成像、稳态荧光、高光谱等 5 个独立的成像暗室,采集植物的形态结构参数和生理生化参数,以此来分析植物生长、水分利用、生物量等表型信息。

1.2 面向田间的植物表型平台

温室中的植物表型信息与田间的植物表型信息相关性有限,不能代替田间表型研究。田间环境可以研究植物在自然条件下的性状,气象环境真实,土壤不受限于盆,且环境开阔,有利于高通量植物表型的研究,方便全球定位系统(GPS)、地理信息系统等技术的融合使用,空间解析度好,有助于发现野外自然条件对于生物变异和生物多样性的影响,研究成果也可直接应用于生产实践中。面向田间的植物表



图 6 内布拉斯加大学的传送带式温室高通量植物扫描成像暗室表型平台

Fig. 6 Chamber high-throughput phenotyping platform for greenhouse in UNL

型平台从近端到远距离精确、连续采集单个叶片或植物器官、单株植物、小地块和整个农场,主要包括车载式、自走式、门架式、悬索式以及无人机、航空遥感和光谱卫星成像等几种类型(图 7)^[42]。

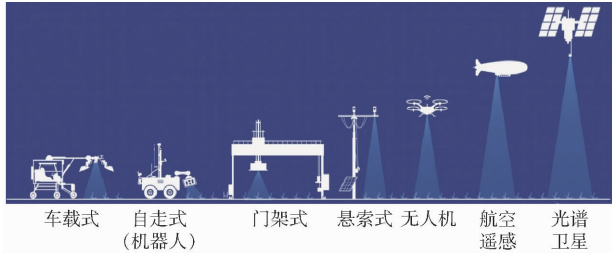


图 7 面向田间的植物表型平台

Fig. 7 Phenotyping platform used in field

1.2.1 车载式植物表型平台

车载式植物表型平台^[43]主要是指由拖拉机等驱动^[44-46],按照植物种类和生长状况布置传感器,并搭载其他配件(如电力设备、数据存储器等)的平台。这种平台旨在降低成本、减少人力和提高工作效率。这类平台可以在 GPS、陀螺仪等配合下实现自动导航。由于田间土壤分布异质化等特点,车载系统在行进过程中不可避免地存在颠簸和抖动。同时,它对作物生长有较大的机械影响,常引起土壤压实,从而对植物造成损害,且由于机身高度有限,主要适用于小麦、棉花等低矮作物,并受到行株距和植物空间限制。除了田间土壤条件可能限制操作外,许多地面车辆需要人工操作,无法快速通过试验田,也限制了该方法的高通量表型分析能力。在特定的气候时期,潮湿的土壤条件可能是一个限制因素。如对于冬季作物来说,只要土壤没有冻结,车载式表型平台就无法顺利下地,因此阻碍了表型信息的采集。

爱荷华州立大学开发了搭载在约翰迪尔 1026R 型小型拖拉机上的植物表型平台,如图 8 所示^[47]。该系统除了拥有多个进行植物表型数据采集的 GRAS-20S4C-C 型深度相机外,还配备了 Topcon 350 型自动导航系统和 AGI-4 型接收器/转向控制器,实现

了自动在田间行驶采集表型数据。结合天线、接收器和转向控制器,可达到 2 cm 的定位精度。一个可旋转的平台连接在拖拉机前,用于支持立体摄像机和调节摄像头到作物之间的距离,一次拍摄两排立体图像,多幅图像进行拼接来实现作物表型信息的全采集。



图 8 搭载在小型拖拉机上的表型平台
Fig. 8 Phenotyping platform mounted on John Deere 1026R sub-compact utility tractor

美国内布拉斯加大学林肯分校开发的田间高通量表型分析平台(图 9)用于大豆和小麦的田间数据采集^[48],搭载了超声波传感器、热红外辐射仪、植被覆盖指数传感器、光谱测定仪和 RGB 相机,将这些传感器按照模块固定在传感条上,并配有 GPS 定位和温湿度环境条件采集等功能,能在野外田间进行大范围的快速表型数据采集提取。



图 9 美国内布拉斯加大学林肯分校的田间高通量表型分析平台
Fig. 9 Platform to mount multi-sensor system for high throughput field phenotyping

美国农业部开发了搭载在高地隙拖拉机上的田间高通量表型分析平台(图 10),主要用于棉花等冠层结构复杂、株型矮小植物的表型信息监测^[49]。有 4 个可调臂搭载在该高地隙拖拉机前臂上,集成安装了多个可进行近距离拍摄的传感器同时采集数据。传感器臂的高度可根据植物生长的时间进行调节,安装了惯性测量单元(IMU)和实时动态差分定位系统(RTK-GPS),前臂还采用阵列的形式安装了超声波传感器 Honeywell 和 Pepperl+Fuchs、激光雷达传感器 LidarLite、扫描波束传感器 LMS511。试验结果表明该传感器集成系统可以提供更精确的植物株高,用于鉴定水分和营养缺乏引起的植物胁迫表型反应。



(a) 前臂配备铝槽安装包括惯性测量单元(IMU)和实时运动全球定位系统(RTK-GPS)的近端传感器



(b) 前臂安装的采集数据的其他传感器阵列

图 10 搭载在高地隙拖拉机上的田间高通量表型分析平台

Fig. 10 High-clearance tractor fitted with front boom using phenotyping proximal sensors

1.2.2 自走式植物表型平台

自走式植物表型平台也称为机器人表型平台,其自身可以提供驱动动力、行走动力,不需要其它动力提供就能完成表型信息采集作业。在设计自走式植物表型系统时,需要考虑 4 个主要的部分,即移动平台、导航定位、仪器装备和数据管理。图 11 为美国密苏里大学研制的 Vinobot 机器人表型平台^[50]。该平台搭载深度相机(获取深度信息)和环境传感器(温度传感器和光强度传感器),按照预定导航线路进行田间表型信息采集,从而减少人力,提高工作效率。该平台适用于高粱、玉米等田间作物。机器人表型平台的优势是设置好行走导航线路后就不需



图 11 Vinobot 机器人表型平台
Fig. 11 Vinobot phenotyping robotics

要人工控制,可全天 24 h 连续获取表型信息,且体积较小。

图 12 为爱荷华州立大学开发的机器人表型平台^[51]。通过集成 3D 机器视觉,采集侧视图 3D 点云作物行数据,建立的点云处理算法可估算预测植物整个生长阶段的高度、叶角、植物朝向和茎干直径等表型参数,机器人平台从连续深度帧中获得侧视点云数据,并进行信息记录,在 RTK-GPS 传感器的作用下产生匹配精准定位的表型数据信息。

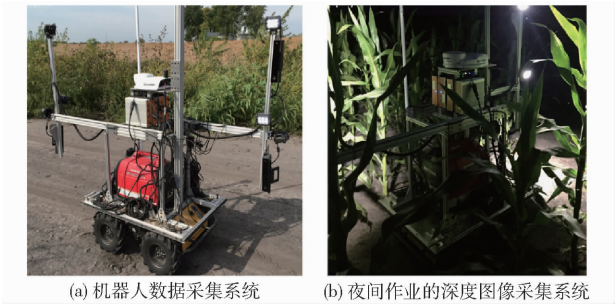


图 12 基于 3D 机器视觉的表型信息自动采集机器人平台
Fig. 12 Automated plant phenotyping robot using 3D machine vision

1.2.3 门架式植物表型平台

田间环境条件复杂,不利于人工控制,比如从白天到夜间的光照强度变化会影响成像技术的准确性;另外,车载式平台可能会因路面不平导致设备抖动,进而影响成像质量。为获得高精度表型信息,且对植物进行全天监测、不因设备抖动而影响成像质量,门架式田间表型平台应运而生。门架式表型平台是指在田间搭建固定轨道,利用电机驱动传感器系统对植物进行监测的移动平台。该系统可在任何环境下进行全天候测量,且不会由于机构抖动而影响成像质量,是采集高分辨率表型信息较为理想的田间平台。

比较有代表性的门架式植物表型平台有荷兰 Pheno Spex 公司的 FieldScan 平台(图 13)^[52],它采用植物激光三维扫描测量仪 PlantEye 作为核心,并集成了其它多种传感器来获取植物生长情况。通过 3D 的顶部成像,不仅能获得叶面积、叶倾角、冠层等参数,还可在任何环境条件下全天候测量,同时还能确保较高的精度和通量。

英国洛桑研究所使用的 Field Scanalyzer 门架式植物表型平台(图 14)是利用门架式起重系统设计和组建的 3 轴表型系统^[53],可对 10 m × 110 m 范围内的作物以高分辨率进行全天 24 h 自动化监视。 X 轴方向的运动是通过轨道系统进入地面,以允许自然排水和无障碍运行,传统的混凝土地基可以充当流动屏障, Y 轴垂直于轨道,并且承担摄像机设置的



图 13 FieldScan 门架式植物表型平台
Fig. 13 FieldScan gantry phenotyping platform



图 14 Field Scanalyzer 门架式植物表型平台
Fig. 14 Field Scanalyzer gantry phenotyping platform

升降装置, Z 轴是升降单元上下移动的方向。 X 轴运动单元是由两个变频电源组成,被绑定在支撑梁上, Y 轴包括门式框架,并保护 Z 轴的运动,Field Scanalyzer 系统的推进包括两个电动逆变器供电引擎,驱动底部两个齿轮传输, Y 轴和 Z 轴同样是由电动逆变器和齿条一起供应运转,确保系统在 X 、 Y 、 Z 轴上的精密运动。门架式植物表型平台所搭载的照明装置方便数据的收集,传感器包括多波长成像系统、测量叶绿素荧光传感器、三维可视化系统和测定作物高度的激光系统。

1.2.4 悬索式植物表型平台

悬索式植物表型平台固定在某一个田间地块,采集的表型数据来源于自然环境,可靠度高,但它的缺点是采样地块固定,植物种植面积和品种有限。

瑞士联邦理工学院建立的田间高通量植物表型平台是一个悬索式多传感器平台,用于自动化、精确、高通量地进行植物表型数据采集^[54]。它位于瑞士苏黎世植物科学研究所,在 1 hm² 的矩形田块内配备 4 根 24 m 高的塔柱(图 15a),塔柱顶端的滑轮引导缆绳,缆绳由位于每根塔柱底部的绞车操作(图 15b)。配有多个成像装置的传感器头连接在电缆上(图 15c),通过控制绞车调整缆绳的长度,从而调整传感器头的位置。每根绞车有 2 根缆绳,总质量为 90 kg 的传感器头由 8 根缆绳携带,不仅确保传感器头不会在缆绳断裂的情况下坠毁,还起到了抗风、防倾的作用。传感器头在田间上方任何位置

的定位高度最大可达 6 m,位移速度最快为 2 m/s。搭载的传感器(图 15d)包括 2 个单反相机(佳能 5D

Mark II)、激光扫描仪(Faro Focus 3D)、热成像仪(InfratecVarioCAM)。

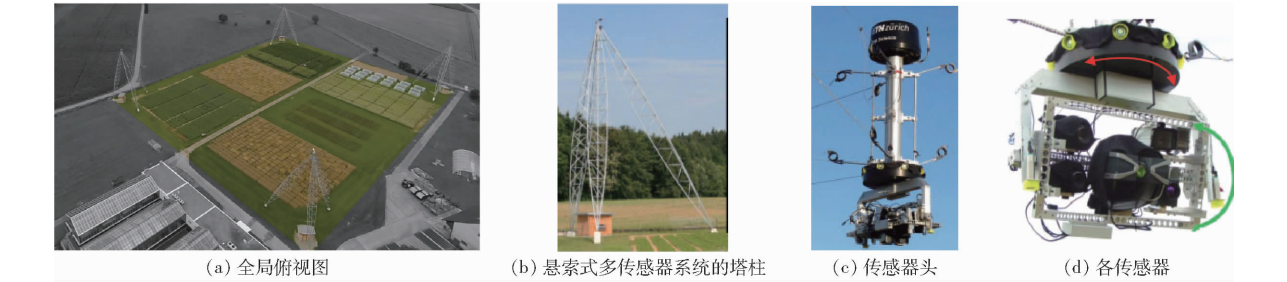


图 15 瑞士联邦理工学院的田间高通量植物表型平台

Fig. 15 Field cable-suspended high-throughput phenotyping platform at ETH Zürich

美国内布拉斯加大学林肯分校建立了田间悬索式植物表型平台 Spidercam,如图 16 所示^[55]。该悬索平台上搭载有多个摄像头和传感器,如 RGB 相机、近红外相机、激光雷达和多光谱仪,可以准确地定位在一个田块进行信息传感和表型成像^[56]。该系统有 4 个塔杆牵引若干缆绳,传感器集成系统在

缆绳中间的交汇处。缆绳上的张紧力根据其位置进行实时动态调整,通过缩短和延长每一根缆绳,精确控制传感器系统到达一个特定的位置,从地面向最高高度达 9 m。该场地还配备了先进的自动化气象站,以及先进的地下滴灌系统,用于在 15 m × 20 m 的地块上进行水和肥料的精确施用。

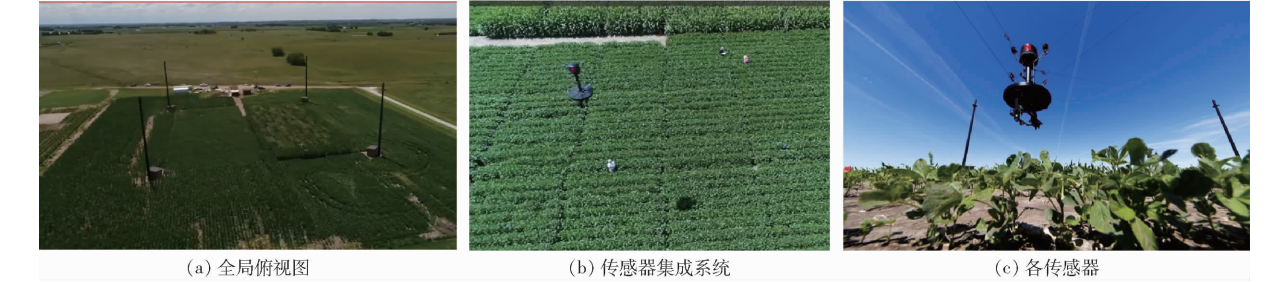


图 16 美国内布拉斯加大学林肯分校的 Spidercam 田间悬索式高通量植物表型平台

Fig. 16 Spidercam field high-throughput phenotyping platform at UNL

1. 2. 5 无人机植物表型平台

无人机植物表型平台是指将用于测量作物生长和发育的传感器搭载到小型无人机,以获得作物生长参数的平台^[57]。它相比车载平台具有更广泛的测量面积与更高的测量效率。但是无人机植物表型平台通常飞行时间短,受载荷限制,只能携带小型传感器,比车载平台能搭载的传感器数量要少,因此采集的表型信息有限。而且,在多风、大风的条件下操作会导致很多问题发生,同时,在无人机下面的空气湍流会强烈影响冠层结构。另外,基于无人机的植物表型平台通常离作物冠层很远,因此,图像的分辨率通常很低。目前利用无人机植物表型平台搭载热像仪监测小麦和玉米冠层温度、气孔导度和叶片水分状态等指标的精度较高,而在棉花应用上精度较低^[58]。

考虑到灵活性与飞行时间,最广泛使用的小型无人机类型是多旋翼飞行器和固定翼飞行器^[59]。多旋翼飞行器由 4 ~ 8 个螺旋桨驱动,可以在不同高度飞行且可以在不同高度悬停,具有较强的灵活性,它能在 GPS 引导下水平或者垂直飞行,具有悬停能

力,且对起降条件要求较低,只需要较短的停靠时间。图 17 为 HiSystems 公司安装有 RGB 传感器的 MK - Oktokopter 旋翼无人机^[60]。与多旋翼飞行器相比,固定翼飞行器(图 18)的飞行时间较长,且具有更快的飞行速度和更高的飞行高度,且续航较长,但无法悬停,且由于高速拍摄会导致图像模糊,需使用高快门速度的成像传感器。目前在田间作物表型解析应用中,多旋翼飞行器表型平台的应用较为广



图 17 HiSystems 公司安装有 RGB 传感器的 MK - Oktokopter 旋翼无人机

Fig. 17 Rotary-wing UAV with RGB sensors developed by HiSystems company

泛,然而,续航时间短、有效载荷不足和易受天气影响是限制其广泛推广应用的主要瓶颈因素^[61]。在这种高速条件下采集作物的表型信息,会导致图像模糊,可以通过改进成像传感器功能来改善^[62-63]。目前正在改进电池与电机的性能以延长飞行时间,如使用太阳能资源等。



图 18 固定翼式无人机植物表型平台
Fig. 18 Fixed-wing UAV phenotyping platform

1.2.6 其他远距离遥测植物表型平台

随着技术的发展,高分辨率、高质量的传感器成像系统重量已经超过了无人机的有效载荷限制,因此面向田间的遥测植物表型需要更大的平台,如飞机和卫星。田间大规模的植物表型监测和大面积的病虫害识别对指导不同的田间管理和植物栽培具有重要的现实意义^[64]。最近,遥测植物表型卫星平台陆续投入使用,其配备多个传感器,包括美国国家航空航天局的星载热辐射计、土壤水分监测仪、高光谱红外成像仪等,这些传感器在卫星平台上大尺度收集高分辨率光谱和环境数据,并提供缓解土地干旱和植物水分利用效率低下的方案^[65-67]。

综上所述,面向温室的植物表型平台主要按照植物移动或传感器移动两种方式来实现,“植物移动”就是传感器保持固定位置、目标植物通过传送带等运输平台进入到采集区进行图像采集,但传送带的搬移或转盘的旋转会导致植物尤其是叶片微小、茎秆细长类型植物的器官抖动,影响表型信息采集的质量,使得图像的噪声过大,影响对植物表型信息的采集和分析。“传感器移动”就是植物原地生长、通过移动传感器到目标植物种植区域进行图像采集等表型信息获取,这种扫描作业方式保持了植物位置的固定,对植物的真实生长干扰少,传感器移动的灵活性大,工作效率高,成为当前研发的主要方向。但是,传感器在移动过程中实时采集大规模植物的群体数据并实现高通量的表型参数提取,对于硬件集成和软件开发而言都是巨大的挑战。面向田间的植物其种植模式决定了只能采用“传感器移动”的方式对固定有效观测区内植物进行连续观测,表型平台面临着环境因素互作、高密度种植、采

集规模尺度大等问题,其难点在于环境尤其是光照的复杂性和不稳定性,这给图像处理带来了很大的难度。另外,在田间,植株以群体而非单株的形式生长,不同植株间相互遮挡,不同器官间密度也存在差异,这给研究田间群体条件下单株植株的表型带来了很大困难。

2 面向植物表型信息的图像分析技术

植物表型信息平台可进行精确、自动化和可重复的植物特性参数测量,涉及形态结构、幼苗活力、生物量、产量等,还可用于获取光合作用、蒸腾作用、病虫害和抗逆性等性状。植物表型信息采集系统主要通过图像采集技术对植物的物理、生理、生化等信息进行成像^[68-69],然后通过图像数据分析技术对获取的表型参数进行解析,提取影响植物产量的相关参数,用于分析表型与基因组的关系,从而为生长监测、种植管理、胁迫响应和大田估产智能决策提供理论依据和技术支持,对需要进行操作的植物采取一定作业措施。

2.1 图像采集技术

量化植物表型是实施植物表型分类的关键步骤。现代图像采集技术具有很高的分辨率,可以实现多维和多参数数据可视化。成像技术用于量化植物生长和产量的复杂性状,以便在室内或田间对植物表型进行分析。使用图像采集技术来实时监测植物生长和胁迫下的动态反应也可以更容易地实现。目前,植物表型主要成像技术包括可见光成像、高光谱成像、红外成像、近红外成像、热成像、荧光成像、三维成像、激光成像、CT 技术等^[70-71],这些成像技术对应的传感器能够进行图像采集从而得到不同的植物表型参数。表 2 对当前主流图像采集技术的传感器、原始数据、获取参数、应用优势和成像环境等方面进行了分析^[72-74]。

图 19 展示了利用不同图像采集技术获取和分析的拟南芥图像。使用可见光成像技术获取的图像用来测量植株的大小、颜色和形态结构,使用荧光成像技术获得的图像用来分析评估植物叶绿素含量,以及使用近红外成像技术获得的图像用于监测植物的含水量^[91]。开发准确、自动、稳健的图像分析算法,从图像中提取感兴趣的表型性状,是自动化表型测量的关键。植物生长是一个复杂的动态系统,随着时间推移,植株的外观表现如形状、大小、颜色、形态、结构、纹理等都会不断改变。同一时间节点下不同品种的植株,其外观表现差异也很大,这些因素都增加了自动化植物图像分析的难度。

表 2 不同图像采集技术在植物表型中的应用

Tab.2 Summary of different sensors used in plant phenotyping research

成像技术	传感器	原始数据	获取参数	应用优势	成像环境
可见光成像	CCD 相机 ^[75-76]	灰色或彩色图像 (RGB 通道)	尺寸、株型、几何结构、绿度等冠层和形态参数、投影面积、生长动态、地上部生物量、产量性状、穗部性状、根系结构、自吸萌发率、胚轴生长、开花时间	成本低,具有颜色信息	室内、田间
高光谱成像	光谱成像仪 ^[77]	连续或离散光谱	叶面及冠层水分状况、植被健康指数、圆锥花序健康状况、覆盖密度	获取植物的健康状况,植物类型识别	室内、田间
红外成像	红外相机	红外区域每个像素的连续或离散光谱	冠层或叶片温度、昆虫/病原体感染情况	通过气孔反应测量作物应力	室内、田间
近红外成像	近红外相机 ^[78]	近红外区域每个像素的连续或离散光谱	含水率、叶面积指数、叶绿素含量	冠层机构信息获取,效率高	室内、田间
热成像	热成像仪 ^[79]	近红外区域每个像素的连续或离散光谱	冠层或叶片温度、受虫害侵染情况	虫害和水分胁迫响应监控	室内、田间
荧光成像	荧光成像仪 ^[80]	红、远红区域的基于像素的荧光发射图	叶绿素监测、光合作用相关参数	叶片健康状况,光合状况	室内、田间
三维成像	立体相机 ^[81] 、深度相机 ^[82] 、飞行时间相机 ^[83]	深度图	植物高度、芽结构、叶角分布、分枝结构、树冠结构、根结构	三维参数获取,速度快,成本低	室内、田间
激光成像	激光雷达扫描仪 ^[84-85]	深度图、3D 点云	位置、冠层结构、植物高度、叶角分布、郁闭度、叶面积指数、生物量	三维形态获取,精度高,穿透性好	室内、田间
CT	X 射线 ^[86]	体素和组织切片	分蘖数量、种子品质、根参数、三维形态参数、植物显微结构	品质检测	室内
雷达	雷达 ^[87-88]	点云	位置、植株高度、地上部分生物量、冠层覆盖和叶面积指数	三维形态获取	室内、田间
磁共振成像	磁共振成像系统 ^[89]	映射图	三维形态参数、含水率、根系	三维形态获取	室内
正电子发射探测	正电子发射探测器 ^[90]	放射性示踪剂图与和正电子发射信号的配准	物质的分配和转运、营养的流动	植物的生理活动,如光合作用和碳分配	室内

2.2 图像分析方法

图像数据分析是对成像传感器得到的植物图像进行处理分析。通过对传感器捕获的图像进行处理,提取出可能影响作物产量的表型参数,然后对获取到的表型参数进行整合分析,从而准确分析计算生物量、叶面积指数、生长速率等与作物产量相关的性状,进一步研究控制该性状的基因,实现基因改良,提高作物产量的目标。植物叶片在电磁波谱上的吸收和反射率特性可以用来评价许多生物物理特性,对光谱反射数据进行经验性处理与分析,能够构建大量的植被指数,可用来监测作物的叶面积指数、叶绿素含量、植株养分和水分状态、生物量和产量等表型信息。在图像数据分析算法中,重点考虑的两个因素是获取的图像类型以及如何对其进行分析处理。例如作为生物量的重要指标之一,归一化植被指数 (Normalized difference vegetation index, NDVI) 被用来表征作物生长状况和预测叶面积指数、产量,确定 NDVI 有多种方法,可以使用无人机采集的植被覆盖度图和 RGB 图像之间的降尺度与随机回归来预测裸地、光合植被和非光合植被覆盖,也可以通

过基于多光谱图像中识别的终端元件进行光谱分离,还可以使用基于对象的分类法标记图像片段来确定覆盖指数^[92-93]。

图 20 为基于图像的植物表型分析技术和工作流程,总结了当前的图像数据分析处理方法,并介绍了基于图像的植物表型工作流程,这些分析技术促进了基于图像的表型学的发展。图像数据分析包括图像预处理、图像分割、特征提取和机器分类等环节。

图像预处理的目的是提高对比度和消除噪声,从而增强给定图像中感兴趣的部分,可以使用图像裁剪、区域限制、对比度改善等简单操作或主成分分析、聚类分析等复杂算法来进行图像预处理,然后才能进行有意义的图像分割。

从图像中提取信息是通过分割来完成的,图像分割是植物表型图像处理的核心,其目的是提取感兴趣的部分,即去除图像的背景或其它无关的组件。因此,最终得到一个具有重要区域的分区图像,重要区域可以定义为前景对背景,或者通过从图像中选择多个单独的组件^[94]。所选区域的构建可以基于颜色、光谱辐射度(植被指数)、边缘检测、相邻近似

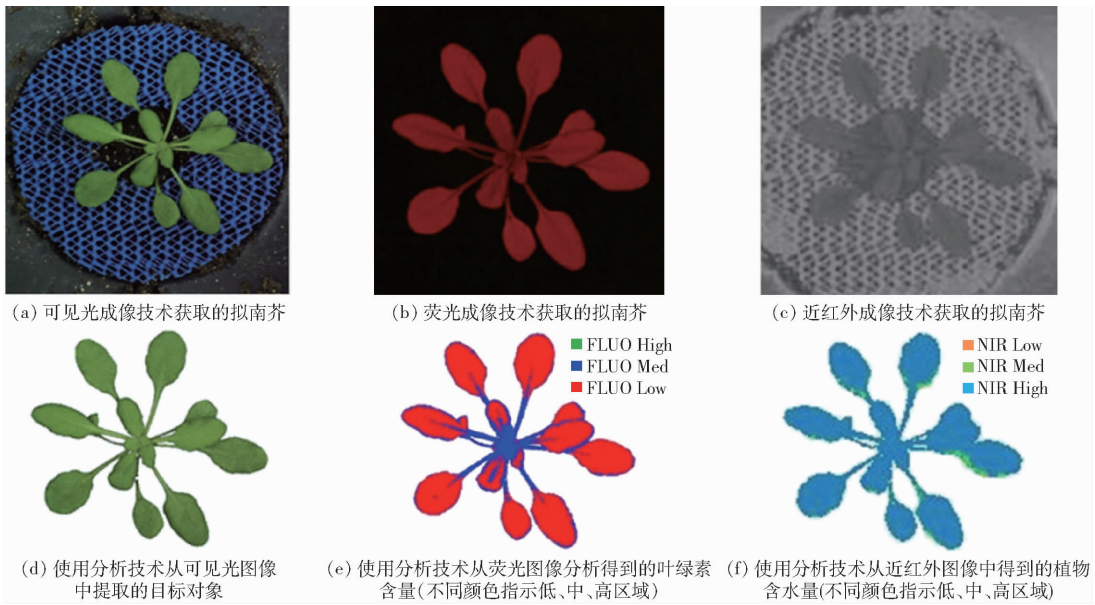


图 19 用可见光、荧光和近红外成像技术采集及分析的拟南芥图像

Fig. 19 Illustrative images of *Arabidopsis thaliana* captured with visible, fluorescence and near infrared technologies

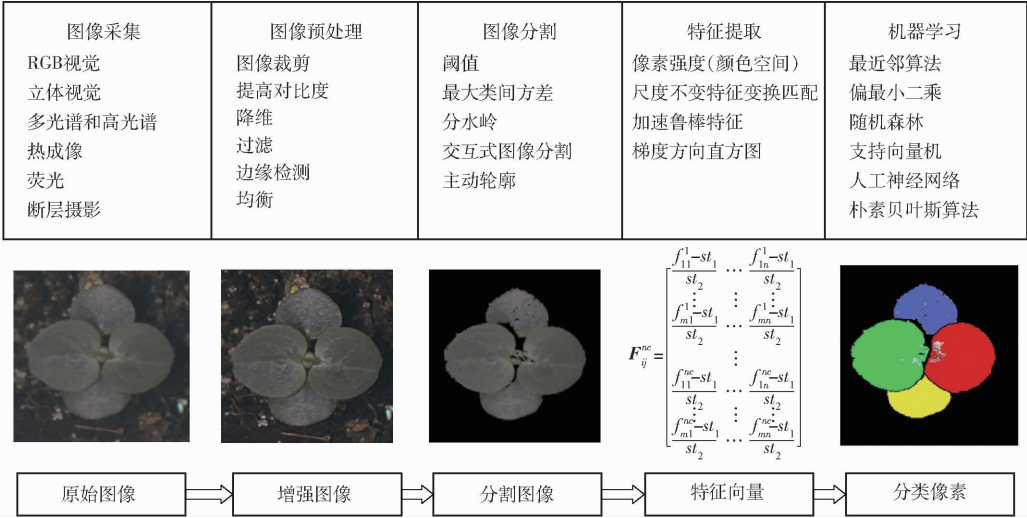


图 20 基于图像的植物表型分析技术和工作流程

Fig. 20 Analysis technique and basic workflow in image-based plant phenotyping

性等图像特征,或者通过机器学习进行集成的组合。图像分割时,感兴趣的对象由纹理、颜色等参数中像素的内部相似性来定义,最简单的算法是阈值分割,根据强度级别在灰度上创建像素组,从而将背景与目标分离。

特征提取是基于计算机视觉的目标识别和分类归纳的支撑技术之一,其目的是提供各组分类以进行机器学习,从图像中提取的特征被处理成“特征向量”,包括边缘、像素强度、几何形状、不同颜色空间像素的组合等。特征提取是一项艰巨的任务,需要对数百种特征提取算法进行测试,并进行各种算法的组合测试以提取可靠的表型数据。

高通量图像采集技术所产生的大量数据促进了机器学习统计方法的使用,机器学习利用各种统计和概率工具从植物表型的海量数据中“学习”,对独

特的数据进行分类,识别新的模式,并预测新的趋势^[95]。机器学习为数据分析提供了框架,使用因素组合来识别模式,而不是执行片面的分析^[96]。经过机器学习这个最终环节,就可以实现叶长叶宽、面积周长、叶片个数、叶面倾角、生长角度、卷曲度、叶空间分布、叶绿素含量等叶片表型参数的获取^[97]。机器学习方法的使用依赖于数据预处理的 3 个关键方面,即识别、分类和量化。最近邻算法、偏最小二乘、随机森林、支持向量机、人工神经网络和朴素贝叶斯算法等建模方法在解析基于光学成像的植物表型信息时具有广泛的应用。由于波段间反射率有着密切的关系,造成线性模型所需参数的重复,因此在解析植物表型的图像数据时可以利用偏最小二乘法、主成分分析和人工神经网络等方法,结合高光谱信息,构建包含更多波段的模型,以期更好的解释模型预

测的变异。针对基因型+表型的数据建立数据库,以基因组数据为输入变量、以表型数据为输出变量,以实现从品种的基因型来预测表型,进而通过改良品种来提高产量。

2.3 智能决策

智能决策将图像数据分析得到的表型数据与预先设定好的标准数据进行比对,从而及时进行决策,对与标准数据有出入的植物采取一定措施,图像采集和图像数据分析都是为智能决策服务的,从而为精确育种、精确施肥、精确灌溉、精确施药、精确采收等精确农业全过程提供理论支持和技术依据^[98]。

对于用在室内表型平台的智能决策,计算机按照预先设定的程序判断是否对植物采取措施。例如,植物在低肥或缺水胁迫下,其叶片就会产生失绿、发黄、发蔫、枯萎等颜色和形态变化,通过图像处理监测到这种表型变化后,进行智能决策并提高其肥料的影响水平以确保植物的正常生长^[99-100]。荷兰的 Ovata 多肉植物公司采用 CCD 相机对传送装置上的多肉植物进行图像采集,并通过图像处理对其进行植物高度、冠幅等长势数据计算,利用分级系统将植物按照其长势分成不同的等级,利用机器人将不同等级的多肉植物放到相应的苗床,送至不同的温室种植区进行培养。整个环节实现了全自动化处理,极大节省了人力。

对于用在田间表型平台的智能决策,可根据提取的性状参数进行作物产量预测,并制定相应的栽培管理措施。如在作物早期至中期多次收集光谱反射率数据,然后利用数据计算植被指数,建立动态变化模型和季节性粮食产量预测模型,继而进行诊断决策和追肥的定量调控^[101]。利用荧光成像在不破坏植物叶片的情况下,采集叶绿素指标,不仅可以分析其化学元素含量,还可以评估产量,并决定农业生产中化学农药的投入^[102]。利用热成像仪获取光谱反射率和冠层温度等性状也可以预测作物长势,而且在整个生长季节可以多次测量,不仅可以监测植物生长,还可以分析估计籽粒产量,并对育种改良计划进行决策^[103]。

综上所述,植物表型信息采集平台通常是自动化的,因此,在植物生长的整个生命周期中,可以多次获得有关植物表型的数据。获取图像是植物表型信息采集平台的基本功能,当前的挑战在于对图像的分析。成千上万的、在短时间内获得的图像可以经过图像分析技术提取出高度、叶片数量、分蘖数、冠层覆盖度、叶面积、地上部生物量、生长速度和水分利用效率等^[104-105]。对于玉米、高粱、水稻等单子叶作物的全生长阶段和棉花、大豆、花生等双子叶植

物的早期生长阶段,由于各器官间无遮挡或仅有轻微遮挡,可拍摄多个角度下的植株图像,开发对应的图像处理与分析技术计算不同角度的植株投影面积,进而提取出各个表型性状,估测叶面积或地上部生物量。当植株长大尤其是分蘖后,叶片间遮挡较严重,不同器官间其密度增大,简单的投影面积已经无法准确估测叶面积或地上部生物量,这时需结合生长天数、形态学参数、纹理参数等能反映植株生长情况的特征参数来提高生物量的估测精度。通过分析植株的红外成像和颜色等光学成像信息,还可定量研究由于胁迫或病变等引起的植株受损衰老程度、气孔导度、叶绿素含量、光和功能等生理生化表型性状的改变,这些复杂参数的无损估测是比较多种植物基因型资源利用效率和抗逆性的重要依据^[106]。

3 研究展望

植物表型信息的获取速度缓慢,阻碍了遗传和基因组分析的进展,随着表型信息采集技术与平台的不断成熟,将在农林业中得到更广泛应用。整合有效资源,建立相关的研究设施,开发性价比高的表型研究平台,对推动我国分子育种和加速挖掘种质资源至关重要,有助于推进我国植物育种和农业的跨越式发展,展望未来,植物表型信息采集平台与分析技术将有以下发展热点和趋势:

(1)开发植物表型信息采集平台的多传感器集成系统,实现高整合度、高分辨率、抗干扰性强的目标。近年来,单独使用某种成像传感器获取作物表型信息受限于测量样本批量少、处理速度慢、分析精度低及所得表型参数单一而不能全面满足科研及应用需求。大部分现有表型采集平台都只针对少数几个表型性状甚至是单一表型性状,而在植物表型研究如抗旱、抗倒伏、耐盐碱、抗病虫害等抗性特征筛选中,往往需要同时提供多种表型信息,以便于更准确全面地进行分析。面对快速和高通量的科研需求,今后的表型信息采集平台将融合多种传感器,并能够自动收集数据,充分整合它们的性能以实现多个参数的并行测量,全面提取表型性状。所以,应选用高分辨率、抗干扰性强的传感器,并优化它们的安装位置和角度以充分利用其性能。

(2)将植物生长环境监测模块融入植物表型信息采集平台中。同样的作物、同样的基因在不同的环境下,生长出来的表型可能就不一样,可见研究表型与基因、环境之间的关系至关重要。表型受到基因及环境的交互影响控制,植物生长和发育与生长环境密切相关,然而现有的植物表型信息采集平台

很少将生长环境纳入到监测体系,从而缺少了一项与植物生长发育息息相关的指标。环境如种植季节和栽植密度,生长过程中的生物胁迫及温度、湿度、水分、光照、营养等非生物胁迫都会在很大程度上影响植物的生长发育,从而影响到其表型。因此,在记录表型信息的同时,必须记录植物生长过程相对应的环境信息。监测植物生长环境对于分析不同基因型植物的表型变化很有必要。通过在表型信息采集平台上安装相应环境传感器(如土壤养分测试仪、温湿度传感器、辐照度测量仪),监测土壤养分、环境温湿度以及太阳辐射等参数,并结合植物表型建立相应数据库系统,从而分析植物表型与生长环境之间的关系。

(3)开发针对林木的表型信息采集平台。目前对农作物进行表型分析的平台很多,却鲜见对林木的表型分析平台。与农作物相比,林木的以下特点不便于对其进行表型采集和分析。首先,林木一般比较高,这就要求对林木进行表型信息采集的平台有足够的高度;其次,林木多枝且叶密,更容易造成叶片间的遮挡,意味着更不易获取完整的表型信息;第三,林木的生长周期一般较长,不便于对生长周期长的林木进行全生长周期的观测;第四,根系发达和株型较大的林木,决定了这类林木不能像农作物一样在温室内进行培育,因此不便于使用温室自动化表型平台。林木的这些特性意味着对林木进行表型分析的平台结构、图像处理算法及多源数据整合的要求更高。虽然对林木进行表型信息采集有一定的难度,但从林木的经济价值及生态价值角度考虑,有必要通过研究林木的表型(如叶面结构、表皮特性、树高、冠幅、根结构、果实、木质素等),培育出有利于提高经济价值和提升人类生存环境的树种,从而完善表型信息采集系统在植物领域的应用。

(4)对传感器获取的表型数据进行更好的集成与挖掘,从而高效、直观的进行管理与分析。使用多种传感器虽然可以提供丰富的植物信息,但数据量较大,处理起来耗时,如何将各个传感器采集到的数据进行管理及系统分析,从而提取出统一的、比单一数据更好、更丰富的信息以获取表型性状之间的关联也是植物表型研究所面临的难点。解决这一难点,首先应根据监测对象优选出各传感器相应采集到的数据。然后,对优选出的传感器数据进行预处理,避免未经处理的数据在多元集成时影响融合效果。例如,同样对于叶面的监测,激光雷达扫描仪可获取叶面积,光谱成像仪可测试叶面的健康状况,荧光成像仪可分析出叶片的光合作用状况,将这些传

感器得到的叶片数据分别进行提取、处理,并进行融合集成,可得到关于叶片生长发育的全面综合信息。

(5)无损原位根系表型信息采集技术有助于得到地下部分的表型数据。植物表型信息采集技术大多应用于地上可见部分,而地下根系的监测技术较为落后。根是植物生长发育的重要器官,它可以通过改善对营养和水分的吸收来提高植物在资源有限环境中的生存能力。评估识别和有选择地将对环境敏感的根系引入育种计划是改善资源有限条件下农作物生产力的一个新兴领域。目前,主要通过将植物种植在透明的非土壤介质如营养液、凝胶或琼脂培养皿上进行根系表型信息采集,它避免了土壤对成像模块的影响,可直接观察到根系形态及生长状况,其缺点在于这些非土壤介质的理化性质与土壤差别较大,无法真实地展现根系在土壤中的形态及结构的动态发展情况。而且,受限于培养袋和培养皿的种植体积,这种方法只适用于小型作物的根系表型信息采集。未来应发展根系表型信息采集技术,如利用X射线的巨大穿透力和高分辨率(μCT , 可达 $24\ \mu\text{m}$)对植物地下的根系进行表型研究。

(6)表型数据的共享和统一开放的标准将有助于基因组的解码,学科交叉间的深度合作有助于切实将技术转化为生产力。将基因组学信息、表型组学信息及其他组学包括代谢组学、蛋白质组学及转录组学的信息综合起来进行数据重析和深入挖掘,可以快速解码大量未知基因功能、推动作物遗传改良。随着高通量植物表型信息采集技术的快速发展,各表型参数的数据量呈几何级数增长,植物表型大数据时代已经到来。可建立一套完善的数据共享机制,各科研机构获取的表型信息经过处理后,通过云端上传至表型信息库进行共享,用于植物基因组的解码,有助于加快优良作物品种的培育。同时,形成统一开放的技术标准体系,加强各表型平台供应商和开发者之间的协作。表型分析需要植物学家、机电工程师、计算机学家等在植物生理特征、机械科学和图像处理、数据分析的基础上,为选择杂交和遗传增益的材料提供信息。只有依靠各学科合作、多方面交叉,将传感器技术、机器视觉技术和高通量技术与经济实惠的基因组测序和基因分型、机器学习和基因组选择方法相结合,作物生理学家才能够定量测量复杂、难以处理的表型性状,育种学家才有机会快速深入遗传研究。

在现代植物研究与育种中,表型研究面临着机遇与挑战。因此,对表型信息采集技术而言,需要设定非常合理的信噪比以准确地获取表型信息、正确地解释结果、确保重复性;对表型信息采集平台而

言,需要在有限的时间段里,高通量、自动化、快速获取植物的表型信息,同时对环境因子进行全面综合的同步监测。未来,植物表型信息采集平台获取到的表型数据将被更好地分析和挖掘,并把筛选出的长势好、产量高的作物相关数据提供给育种工作者,

从而更好地将基因型与表型数据结合起来,改良作物品种,提高作物产量。今后,随着相关技术的进一步发展,高通量、低成本的植物表型信息采集技术与平台将由试验研究转向生产应用,由技术形成产业,推动基因组学开创崭新的局面。

参 考 文 献

- [1] GERLAND P, RAFTERY A E, ŠEVCÍKOVÁ H, et al. World population stabilization unlikely this century[J]. Science, 2014, 346(6206):234–237.
- [2] PRASANNA B M, ARAUS J L, CROSSA J, et al. High-throughput and precision phenotyping for cereal breeding programs[M]. Netherlands: Springer, 2013.
- [3] JOHANSEN W. The genotype conception of heredity[J]. International Journal of Epidemiology, 2014, 45(531):129–159.
- [4] WINTERHALTER L, MISTELE B, SCHMIDHALTER U. Evaluation of active and passive sensor systems in the field to phenotype maize hybrids with high-throughput[J]. Field Crops Research, 2013, 154(3):236–245.
- [5] 周瑞琼, 张慧春, 周宏平, 等. 喷雾参数间互作效应对农药雾滴飘移影响的风洞试验[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(7):612–617.
- [6] ZHOU Ruiqiong, ZHANG Huichun, ZHOU Hongping, et al. Wind tunnel experiment on influence factors and their interaction to chemical droplet drift[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2019, 37(3):612–617. (in Chinese)
- [7] ZHU J, INGRAM P A, BENFEY P N, et al. From lab to field, new approaches to phenotyping root system architecture[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2011, 14(3):310–317.
- [8] GOLZARIAN M R, FRICK R A, RAJENDRAN K, et al. Accurate inference of shoot biomass from high-throughput images of cereal plants[J]. Plant Methods, 2011, 7(1):2–25.
- [9] 张慧春, 朱正阳, 郑加强, 等. 面向林业病虫害防治的生物农药喷施系统研究[J]. 林业科学, 2018, 54(10):116–124.
- [10] ZHANG Huichun, ZHU Zhengyang, ZHENG Jiaqiang, et al. Research of biopesticide application system oriented to forest disease and pest control[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2018, 54(10):116–124. (in Chinese)
- [11] ROY S J, TUCKER E J, TESTER M. Genetic analysis of abiotic stress tolerance in crops[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2011, 14(3):232–239.
- [12] GEHAN M, FAHLGREN N, HUMMEL T. High-throughput phenotyping of *brachypodium distachyon* under progressive drought and heat stress[J]. Plant AnimGeno, 2015, 95(2):10–14.
- [13] 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/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(10):201–211.
- [14] ZHANG Huichun, WANG Guosu, BIAN Liming, et al. Visible camera-based instrument for 3D phenotype measurement and time-series visual growth model of plant[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10):201–211. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20191022&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.022. (in Chinese)
- [15] 黄霞, 郑顺义, 桂力, 等. 基于点云的谷粒高通量表型信息自动提取技术[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(4):257–264.
- [16] HUANG Xia, ZHENG Shunyi, GUI Li, et al. Extraction of high-throughput phenotypic information of grain based on point cloud[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4):257–264. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180429&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.029. (in Chinese)
- [17] SANKARAN S. High-throughput crop phenotyping technologies[J]. Resource Magazine, 2016, 23(3):24–25.
- [18] PATRICK A, PELHAM S, CULBREATH A, et al. High throughput 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.
- [19] PASK A J, PIETRAGALLA J, MULLAN D M, et al. Physiological breeding II: a field guide to wheat phenotyping[M]. Mexico City: CIMMYT, 2012.
- [20] QIU R, WEI S, ZHANG M, et al. Sensors for measuring plant phenotyping: a review[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(2):1–17.
- [21] HE J Q, HARRISON R J, LI B. A novel 3D imaging system for strawberry phenotyping[J]. Plant Methods, 2017, 13(1):93–101.
- [22] PAULUS S, BEHMANN J, MAHLEIN A K, et al. Low-cost 3D systems: suitable tools for plant phenotyping[J]. Sensors, 2014, 14(2):3001–3018.
- [23] FRANCISCO R, QIN Z, JOHNF R. Stereo vision three-dimensional terrain maps for precision agriculture[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 60(2):133–143.
- [24] MA X, FENG J, GUAN H, et al. Prediction of chlorophyll content in different light areas of apple tree canopies based on the color characteristics of 3D reconstruction[J]. Remote Sensing, 2018, 10(3):429.
- [25] TILLY A N, HOFFMEISTER D, CAO Q, et al. Multitemporal crop surface models: accurate plant height measurement and biomass estimation with terrestrial laser scanning in paddy rice[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2014, 8(1):83671–83694.
- [26] 倪超, 张云, 高捍东, 等. 基于多目视觉的马尾松苗木形态学参数提取研究[J]. 林业工程学报, 2018, 3(2):123–128.
- [27] NI Chao, ZHANG Yun, GAO Handong, et al. Study on extraction of morphological parameters of masson pine seedlings based on multi-view stereo vision[J]. Journal of Forestry Engineering, 2018, 3(2):123–128. (in Chinese)
- [28] FIORANI F, SCHURR U. Future scenarios for plant phenotyping[J]. Annual Review of Plant Biology, 2013, 64(1):267–291.
- [29] MONTES J M, MELCHINGER A E, REIF J C. Novel throughput phenotyping platforms in plant genetic studies[J]. Trends in Plant Science, 2007, 12(10):433–436.
- [30] MINERYINI M, SCHARR H, TSAFTARIS S A. Image analysis: the new bottleneck in plant phenotyping applications corner[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2015, 32(4):126–131.
- [31] 高宇, 高军萍, 李寒, 等. 植物表型监测技术研究进展及发展对策[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(11):5–10.
- [32] 杨万能. 水稻产量相关性状参数自动提取的数字化技术研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2011.

- YANG Wanneng. Research on digital technology of automatic extraction of rice yield related character parameters[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- [28] 段凌凤, 杨万能. 水稻表型组学研究概况和展望[J]. 生命科学, 2016(10):1129–1137.
- DUAN Lingfeng, YANG Wanneng. Research advances and future scenarios of rice phenomics[J]. Chinese Bulletin of Life Sciences, 2016(10):1129–1137. (in Chinese)
- [29] YANG W, GUO Z, HUANG C, et al. Combining high throughput phenotyping and genome-wide association studies to reveal natural genetic variation in rice [J]. Nature Communications, 2014, 5:5087–5096.
- [30] 郭庆华, 杨维才, 吴芳芳, 等. 高通量作物表型监测: 育种和精准农业发展的加速器[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(9):56–62.
- GUO Qinghua, YANG Weicai, WU Fangfang, et al. High-throughput crop phenotyping: accelerators for development of breeding and precision agriculture [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, 33(9):56–62. (in Chinese)
- [31] GE Y F, ATEFI A, ZHANG H C, et al. High-throughput analysis of leaf physiological and chemical traits with VIS–NIR–SWIR spectroscopy: a case study with a maize diversity panel[J]. Plant Methods, 2019, 15(66):1–12.
- [32] GRANIER C, VILE D. Phenotyping and beyond: modelling the relationships between traits[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2014, 18:96–102.
- [33] ACOSTA L M, LIU S, LANGLEY E, et al. Moderate to severe water limitation differentially affects the phenome and ionome of Arabidopsis[J]. Functional Plant Biology, 2017, 44(1):94–106.
- [34] JIANG Y, LI C, ROBERTSON J S, et al. GPhenoVision: a ground mobile system with multi-modal imaging for field-based high throughput phenotyping of cotton[J]. Sci. Rep., 2018, 8(1):1213–1228.
- [35] VARSHNEY R K, THUDI M, PANDEY M K, et al. Accelerating genetic gains in legumes for the development of prosperous smallholder agriculture: integrating genomics, phenotyping, systems modelling and agronomy[J]. Journal of Experimental Botany, 2018, 69(13):3293–3312.
- [36] CANDIDO V, MICCOLIS V, RIVELLI A R. Yield traits and water and nitrogen use efficiencies of bell pepper grown in plastic-greenhouse[J]. Italian Journal of Agronomy, 2009, 4(3):91–100.
- [37] CABRERA B L, MOLERO G, BORT J, et al. The combined effect of constant water deficit and nitrogen supply on WUE, NUE and $\Delta 13\text{C}$ in durum wheat potted plants[J]. Annals of Applied Biology, 2007, 151(3):277–289.
- [38] 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.
- [39] 郭庆华, 吴芳芳, 庞树鑫, 等. Crop 3D—基于激光雷达技术的作物高通量三维表型测量平台[J]. 中国科学: 生命科学, 2016, 46(10):1210–1221.
- GUO Qinghua, WU Fangfang, PANG Shuxin, et al. Crop 3D—a LiDAR based platform for 3D high-throughput crop phenotyping[J]. Science China Life Sciences, 2016, 46(10):1210–1221. (in Chinese)
- [40] GOGGIN F L, LORENCE A, TOPP C N. Applying high-throughput phenotyping to plant-insect interactions: picturing more resistant crops[J]. Current Opinion in Insect Science, 2015, 9:69–76.
- [41] BAI G, GE Y, BLECHA S, et al. Phenotyping transgenic wheat in a greenhouse through multispectral and thermal imaging[C]//An ASABE Meeting Presentation, 2015.
- [42] SHAKOOR N, LEE S, MOCKLER T C. High throughput phenotyping to accelerate crop breeding and monitoring of diseases in the field[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2017, 38:184–192.
- [43] BAO Y, NAKAMI A D, TANG L. Development of a field robotic phenotyping system for sorghum biomass yield component traits characterization[C]//American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2016.
- [44] ANDRADESANCHEZ 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.
- [45] REDDEN L K, COLGAN M. Method for automatic phenotype measurement and selection: WO/2015/006675[P]. 2017–01–05.
- [46] BARKER J I, 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.
- [47] 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.
- [48] BAI G, GE Y, 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.
- [49] 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):700–719.
- [50] SHAFIEKHANI A, KADAM S, FRITSCHI F, et al. Vinobot and Vinoculer: two robotic platforms for high-throughput field phenotyping[J]. Sensors, 2017, 17(12):214.
- [51] BAO Y. Automated plant phenotyping using 3D machine vision and robotics[D]. Iowa: Iowa State University Capstones, 2018.
- [52] WHITE J W, ANDRADESANCHEZ P, GORE M A, et al. Field-based phenomics for plant genetics research[J]. Field Crops Research, 2012, 133(4):101–112.
- [53] VIRLET N, SABERMANESH K, SADEGHI T P, et al. Field Scanalyzer: an automated robotic field phenotyping platform for detailed crop monitoring[J]. Functional Plant Biology, 2017, 44(1):143–153.
- [54] 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.
- [55] SALAFIAN I. Development of the end-effector of a cable-driven parallel manipulator for automated crop sensing[D]. Lincoln: University of Nebraska, 2017.
- [56] BAI G, GE Y, SCHOBY 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(3):71–81.
- [57] SUGIURA R, ITOH A, NISHIWAKI K, et al. Development of high-throughput field phenotyping system using imagery from unmanned aerial vehicle[C]//American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2015:1–8.
- [58] 杨贵军, 李长春, 于海洋, 等. 农用无人机多传感器遥感辅助小麦育种信息获取[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21):184–190.
- YANG Guijun, LI Changchun, YU Haiyang, et al. UAV based multi-load remote sensing technologies for wheat breeding information acquirement[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(21):184–190. (in Chinese)

- [59] 高林,杨贵军,王宝山,等. 基于无人机遥感影像的大豆叶面积指数反演研究[J]. 中国生态农业学报, 2015,23(7): 868-876.
GAO Lin, YANG Guijun, WANG Baoshan, et al. Soybean leaf area index retrieval with UAV (unmanned aerial vehicle) remote sensing imagery[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(7): 868-876. (in Chinese)
- [60] BENDIG J, YU K, AASEN H, et al. Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2015, 39: 79-87.
- [61] 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)
- [62] SANKARAN S, KHOT L R, ESPINOZA C Z, et al. Low-altitude, high-resolution aerial imaging systems for row and field crop phenotyping: a review[J]. European Journal of Agronomy, 2015, 70: 112-123.
- [63] SHI Y, THOMASSON J A, MURRAY S C, et al. Unmanned aerial vehicles for high-throughput phenotyping and agronomic research[J]. PloS One, 2016, 11(7): 1-26.
- [64] YUAN L, ZHANG H, ZHANG Y, et al. Feasibility assessment of multi-spectral satellite sensors in monitoring and discriminating wheat diseases and insects[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 131: 598-608.
- [65] LEE C M, CABLE M L, HOOK S J, et al. An introduction to the NASA Hyperspectral InfraRed Imager (HyspIRI) mission and preparatory activities[J]. Rem. Sens. Environ., 2015, 167: 6-19.
- [66] ENTEKHABI D, NJOKU E, ONEILL P E, et al. The soil moisture active passive (SMAP) mission[J]. Proc IEEE, 2010, 98: 704-716.
- [67] FISHER J, HOOK S, ALLEN R, et al. ECOSTRESS: NASA'S next-generation mission to measure evapotranspiration from the international space station[C]//AGU Fall Meeting Abstracts, 2015.
- [68] 黄成龙,李曜辰,骆树康,等. 基于结构光三维点云的棉花幼苗叶片性状解析方法[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 243-248, 288.
HUANG Chenglong, LI Yaochen, LUO Shukang, et al. Cotton seedling leaf traits extraction method from 3D point cloud based on structured light imaging[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 243-248, 288. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190826&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.026. (in Chinese)
- [69] 朱冰琳,刘扶桑,朱晋宇,等. 基于机器视觉的大田植株生长动态三维量化研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 256-262.
ZHU Binglin, LIU Fusang, ZHU Jinyu, et al. Three-dimensional quantifications of plant growth dynamics in field-grown plants based on machine vision method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 256-262. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180530&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.030. (in Chinese)
- [70] PAULUS S, BEHMANN J, MAHLEIN A K, et al. Low-cost 3D systems: suitable tools for plant phenotyping[J]. Sensors, 2014, 14(2): 3001-3018.
- [71] LI L, ZHANG Q, HUANG D. A review of imaging techniques for plant phenotyping[J]. Sensors, 2014, 14(11): 20078-20111.
- [72] SYED T N, LIU J, ZHOU X, et al. Seedling-lump integrated non-destructive monitoring for automatic transplanting with Intel RealSense depth camera[J]. Artificial Intelligence in Agriculture, 2019, 9(3): 18-32.
- [73] 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.
- [74] DEERY D, JIMENEZBERNI J, JONES H, et al. Proximal remote sensing buggies and potential applications for field-based phenotyping[J]. Agronomy, 2014, 4(3): 349-379.
- [75] LOU L, LIU Y, SHENG M, et al. A cost-effective automatic 3D reconstruction pipeline for plants using multi-view images[M]. Springer International Publishing, 2014: 221-230.
- [76] 仇瑞承,苗艳龙,季宇寒,等. 基于RGB-D相机的单株玉米株高测量方法[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 211-219.
QIU Ruicheng, MIAO Yanlong, JI Yuhan, et al. Measurement of individual maize height based on RGB-D camera[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 211-219. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2017S034&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.034. (in Chinese)
- [77] HUANG J R, LIAO H J, ZHU Y B, et al. Hyperspectral detection of rice damaged by rice leaf folder (*Cnaphalocrocis medinalis*) [J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2012, 82(1): 100-107.
- [78] GE Y, THOMASSON J A. NIR reflectance and MIR attenuated total reflectance spectroscopy for characterizing algal biomass composition[J]. Transactions of the ASAE, 2016, 59(2): 435-442.
- [79] JONES H G, SERRA J R, LOVEYS B R, et al. Thermal infrared imaging of crop canopies for the remote diagnosis and quantification of plant responses to water stress in the field[J]. Functional Plant Biology, 2009, 36(11): 978-989.
- [80] JANSEN M, GILMER F, BISKUP B, et al. Simultaneous phenotyping of leaf growth and chlorophyll fluorescence via *Growscreen fluoro* allows detection of stress tolerance in *Arabidopsis thaliana* and other rosette plants[J]. Functional Plant Biology, 2009, 36(11): 902-914.
- [81] 胡鹏程,郭焱,李保国,等. 基于多视角立体视觉的植株三维重建与精度评估[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 209-214.
HU Pengcheng, GUO Yan, LI Baoguo, et al. Three-dimensional reconstruction and its precision evaluation of plant architecture based on multiple view stereo method[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(11): 209-214. (in Chinese)
- [82] LI L, ZHANG Q, DAN F H. Depth imaging-based detection of muskmelon plant for phenotyping in the greenhouse[C]//American Society of Agricultural and Biological Engineers. Montreal, 2014: 2014-2025.
- [83] ATEFI A, GE Y, PITLA S, et al. In vivo human-like robotic phenotyping of leaf traits in maize and sorghum in greenhouse[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 163(7): 1-9.
- [84] WANG H, LIN Y, WANG Z, et al. Validation of a low-cost 2D laser scanner in development of a more-affordable mobile terrestrial proximal sensing system for 3D plant structure phenotyping in indoor environment[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 140: 180-189.

- [85] 张新,高超, MARTIN Kraft, 等. 基于“双毯法”的植物叶态萎蔫辨识研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 322–328. ZHANG Xin, GAO Chao, MARTIN Kraft, et al. Identification of plant leaf wilting based on double blanket method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 322–328. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161144&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2016. 11. 044. (in Chinese)
- [86] KARUNAKARAN C, JAYAS D S, WHITE N D. Detection of internal wheat seed infestation by *Rhyzopertha dominica* using X-ray imaging[J]. Journal of Stored Products Research, 2004, 40(5): 507–516.
- [87] THAPA S, ZHU F, WALIA H, et al. A novel LiDAR-based instrument for high-throughput, 3D measurement of morphological traits in maize and sorghum[J]. Sensors, 2018, 18(4): 1187–1201.
- [88] YUAN W, LI J, BHATTA M, et al. Wheat height estimation using LiDAR in comparison to ultrasonic sensor and UAS[J]. Sensors, 2018, 18(11): 3731–3753.
- [89] HESSE L, LEUPOLD J, SPECK T, et al. A qualitative analysis of the bud ontogeny of *Dracaena marginata* using high-resolution magnetic resonance imaging[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 9881–9895.
- [90] KARVE A A, ALEXOFF D, KIM D, et al. In vivo quantitative imaging of photoassimilate transport dynamics and allocation in large plants using a commercial positron emission tomography (PET) scanner[J]. BMC Plant Biology, 2015, 15(1): 273–284.
- [91] CAMPBELL Z C, ACOSTA G, NEPAL L M, et al. Engineering plants for tomorrow: how high-throughput phenotyping is contributing to the development of better crops[J]. Phytochemistry Reviews, 2018, 6(16): 1–15.
- [92] BAUER A, BOSTROM A, BALL J, et al. AirSurf-Lettuce: an aerial image analysis platform for ultra-scale field phenotyping and precision agriculture using computer vision and deep learning[J]. Biorxiv, 2019, 1(1): 1–30.
- [93] MELVILLE B, FISHER A, LUCIEER A. Ultra-high spatial resolution fractional vegetation cover from unmanned aerial multispectral imagery[C]//International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2019: 14–24.
- [94] PEREZ S F, NAVARRO P J, EGEA C M. Plant phenomics: an overview of image acquisition technologies and image data analysis algorithms[J]. GigaScience, 2017, 6(11): 1–18.
- [95] 袁培森, 任守纲, 翟肇裕, 等. 基于半监督主动学习的菊花表型分类研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 27–34. YUAN Peisen, REN Shougang, ZHAI Zhaoyu, et al. Chrysanthemum phenotypic classification based on semi-supervised active learning[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 27–34. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180903&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2018. 09. 003. (in Chinese)
- [96] 张智韬, 谭丞轩, 许崇豪, 等. 基于无人机多光谱遥感的玉米根域土壤含水率研究[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 246–257. ZHANG Zhitao, TAN Chengxuan, XU Chonghao, et al. Soil moisture content in field maize root zone based on UAV multispectral remote sensing[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 246–257. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190727&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2019. 07. 027. (in Chinese)
- [97] TSAFTARIS S A, MINERYINI M, SCHARR H. Machine learning for plant phenotyping needs image processing[J]. Trends in Plant Science, 2016, 21(12): 989–991.
- [98] MAHLEIN A K, OERKE E C, STEINER U, et al. Recent advances in sensing plant diseases for precision crop protection[J]. European Journal of Plant Pathology, 2012, 133(1): 197–209.
- [99] SANCHO A M, TRILLAS M, BORT I, et al. Use of RGB vegetation indexes in assessing early effects of *Verticillium wilt* of olive in asymptomatic plants in high and low fertility scenarios[J]. Remote Sensing, 2019, 11(6): 607.
- [100] 王丽燕, 朱梦婷, 李莉, 等. 施肥胁迫对温室番茄不同生长期表型数据的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 321–326. WANG Liyan, ZHU Mengting, LI Li, et al. Influence of different fertilization on phenotypic data of greenhouse tomato in all growth periods[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 321–326. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2017S049&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2017. S0. 049. (in Chinese)
- [101] ZHANG K, GE X, SHEN P, et al. Predicting rice grain yield based on dynamic changes in vegetation indexes during early to mid-growth stages[J]. Remote Sensing, 2019, 11(4): 387–395.
- [102] KRSTYNA Z, MILENA P. Possibility to predict the yield of potatoes grown under two crop production systems on the basis of selected morphological and physiological plant indicators[J]. Plant, Soil and Environment, 2017, 63(4): 165–170.
- [103] COOPER M, MESSINA C D, PODLICH D, et al. Predicting the future of plant breeding: complementing empirical evaluation with genetic prediction[J]. Crop and Pasture Science, 2014, 65(4): 311–326.
- [104] 赵春江. 植物表型组学大数据及其研究进展[J]. 农业大数据学报, 2019, 1(2): 5–18. ZHAO Chunjiang. Big data of plant phenomics and its research progress[J]. Journal of Agricultural Big Data, 2019, 1(2): 5–18. (in Chinese)
- [105] 劳彩莲, 杨瀚, 李鹏, 等. 基于消费级深度相机的玉米植株三维重建[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 222–228. LAO Cailian, YANG Han, LI Peng, et al. 3D reconstruction of maize plants based on consumer depth camera[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 222–228. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190724&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2019. 07. 024. (in Chinese)
- [106] 刘哲, 刘帝佑, 朱德海, 等. 作物遥感精细识别与自动制图研究进展与展望[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 1–12. LIU Zhe, LIU Diyou, ZHU Dehai, et al. Review on crop type fine identification and automatic mapping using remote sensing[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 1–12. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20181201&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2018. 12. 001. (in Chinese)