

无人机低空遥感监测农情信息研究进展*

樊湘鹏, 周建平[†], 许燕

(新疆大学 机械工程学院, 新疆维吾尔自治区农牧机器人及智能装备工程研究中心,
机械制造系统工程国家重点实验新疆大学分室, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要: 及时准确地获取田间作物生长状况及环境信息, 是对农作物进行精准管理的前提和基础. 无人机低空遥感技术在获取不同尺度作物影像方面具有不可比拟的优势, 已成为农情信息监测的重要手段和方法. 文章主要针对无人机低空遥感系统的构成、作物长势监测、产量预测、营养诊断、病虫害监测、作物倒伏、生长胁迫诊断等方面的研究和应用进行了总结与剖析, 分析了无人机低空遥感在农情信息监测方面存在的问题, 最后提出了应用前景和发展趋势. 未来的研究应侧重于农情遥感监测的广度和深度不断拓展、智能化不断发展以及低成本、微型化传感设备的探究, 利用多源数据的融合与互补性, 形成通用性强、易操作的解决方案, 进一步扩大无人机低空遥感在精准农业作物表型信息获取与解析中的应用范围.

关键词: 无人机; 低空遥感; 农情监测; 表型信息; 精准农业

DOI: 10.13568/j.cnki.651094.651316.2020.09.26.0002

中图分类号: S127 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2021)05-0623-09

引文格式: 樊湘鹏, 周建平, 许燕. 无人机低空遥感监测农情信息研究进展[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2021, 38(5): 623-631.

英文引文格式: FAN X P, ZHOU J P, XU Y. Research advances of monitoring agricultural information using UAV low-altitude remote sensing[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2021, 38(5): 623-631.

Research Advances of Monitoring Agricultural Information Using UAV Low-Altitude Remote Sensing

FAN Xiangpeng, ZHOU Jianping, XU Yan

(School of Mechanical Engineering, Xinjiang Uygur Autonomous Region Agricultural Robot and Intelligent Equipment Engineering Research Center, State Key Laboratory of Mechanical Manufacturing System Engineering Branch of Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830047, China)

Abstract: Timely and accurate acquisition of field crop growth and environmental information is the premise and basis for accurate crop management. Unmanned aerial vehicle (UAV) low-altitude remote sensing technology has incomparable advantages in obtaining crop images of different scales and it has become an important means and method of agricultural information monitoring. In this article, the system composition of UAV remote sensing platform was summarized, and UAV remote sensing research and application fields including crop condition monitoring, yield prediction, nutrition diagnosis monitoring, plant diseases and insect pests, weeds, crop lodging, growth stress diagnosis were analyzed. There were also research limitations in agricultural information monitoring using UAV low altitude remote sensing and we put forward the application prospect and development trends in the future. It is pointed out that the future research should focus on the breadth and depth of remote sensing monitoring agricultural information expanding development, further intelligent and lowest cost, the micro miniaturization of sensing equipment to explore, using multi-source data fusion and complementary to each other, the solution with strong universality and easy operation, which will be formed to further expand the application of UAV low-altitude remote sensing in crop surface information acquisition and analysis in precision agriculture.

Key words: unmanned aerial vehicle (UAV); remote sensing; crop condition monitoring; phenotypic information; precision agriculture

* 收稿日期: 2020-09-26

基金项目: 新疆维吾尔自治区研究生科研创新项目(XJ2019G033).

作者简介: 樊湘鹏(1993-), 男, 博士生, 从事无人机农情遥感监测、农业信息化与自动化的研究, E-mail: 15099324673@163.com.

[†] 通讯作者: 周建平(1974-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事特种加工技术、高端农牧装备技术和精准农业的研究, E-mail: linkzhou@163.com.

0 引言

无人机遥感是将无人驾驶飞行器技术、遥感技术、传感器技术、遥控技术、定位技术和通讯技术等有机结合,实现遥感数据获取、建模和分析的新型综合应用技术^[1]。无人机遥感获取的影像经拼接、几何校正等处理,对数据进行解析后可实现作物长势监测、产量估测、营养诊断和生长胁迫监测等,已经成为精准农业中获取作物状况和环境因子等田间时空变化信息的重要手段^[2-3]。近十年来,随着微型计算机、通讯技术的迅速发展,无人机遥感监测农情信息研究呈指数级增长,国内外众多学者将无人机遥感用于田间作物表型信息获取和解析,取得了不俗的成果。本文对无人机低空遥感平台进行概述,介绍了常用的无人机和传感器类型,对无人机遥感监测在农情信息提取、解析和应用等方面的进展和不足展开论述,在此基础上提出无人机低空遥感监测农情信息的发展趋势,为农业机械化和信息化从业人员提供技术思路,进一步推动无人机遥感在精准农业中的应用和发展。

1 无人机低空遥感概述

1.1 无人机低空遥感

无人机低空遥感农情监测是以无人飞行器为平台,根据任务需求搭载不同类型的影像采集设备,快速获取高分辨率目标区域的农情数据,并借助一定的图像解析技术获取特定结果。无人机遥感系统主要由无人飞行器、飞行控制系统、定位系统、传感设备、稳定云台(传感器的支持设备)、通讯系统、影像处理平台(如MATLAB、Pix4D、ENVI、PhotoScan)等构成^[4]。

1.2 无人机的种类

根据结构的不同,无人机可分为固定翼、多旋翼、直升机类和飞艇四类。固定翼飞机速度快、飞行时间长,但其成本高、悬停能力较差、速度快时易造成图像模糊。小型多旋翼无人机能够实现定点悬停、中慢速飞行且便于携带,适合定点、重复性高、多尺度、高分辨率的农田信息采集,在农情遥感监测中的应用更为广泛^[5]。无人直升机旋翼大、飞行稳定,能够搭载体量较大的设备,但操作性复杂且噪声大、成本高。飞艇类无人机具有良好的悬停能力和载荷能力,其体积和重量较大,有风条件下稳定性差,在农业信息监测方面应用较少^[6]。

1.3 农情遥感机载传感器的种类

机载传感器作为信息获取的主要部件,其性能和品质是影响获取高精度作物信息并进行解析的重要因素^[7]。经过近十年的发展,在无人机低空遥感农情监测中所用到的传感器种类较多,如RGB相机、多光谱相机、高光谱相机、热成像仪和激光雷达等^[8]。在利用无人机图像进行作物长势监测研究的初始阶段,由于无人机的承载能力有限,在当时所开展的研究多以数码影像或多光谱影像为数据源,虽然无法获取精细光谱特征影像,但在空间分辨率上可达到厘米级。随着无人机技术的日益成熟,无人机高光谱遥感凭借其波段连续性强、光谱数据量大的优势和纳米级的分辨率,被众多学者用于农业领域作物长势监测的研究^[9],并成为观测地表作物的强有力工具。热成像仪通过传感器接收农作物的红外辐射信息,可以快速提取大面积作物冠层温度信息,多用在作物干旱胁迫和含水率分析等方面的研究^[10]。激光雷达获取遥感点云数据也可以对地面农情信息进行反演^[8]。

1.4 无人机农情遥感监测的优势

无人机遥感监测具有快速机动性强的响应能力,适合不同种植结构和不同地形的农田场景,能够在紧急或非紧急状态下为农业种植者、管理者和决策者提供实时准确的遥感数据;无人机遥感成本低,不用考虑飞行员的安全,云层干扰小,作业条件要求低;采用多角度航拍获取不同方向的厘米级分辨率数据,能够有效结合三维冠层高度和正射影像信息,提高反演精度;无人机遥感的强自主性可根据不同的要求搭载不同分辨率、不同类型的传感设备,建立高效遥感数据信息解析模型;无人机遥感对空间异质信息相应敏感,在不同作物和气候条件以及人为管理条件等因素的影响下,农田在宏观尺度上是存在区域差异的,卫星遥感难以克服以上因素对反演精度的影响^[11],而无人机遥感可以在低空范围、小尺度下进行研究,获得大量的高质量影像数据。

2 无人机低空遥感在农情信息监测中的应用

2.1 作物长势监测

长势反映田间农作物生长的状态与趋势,快速获取作物长势信息可为田间管理决策提供重要的依据。作物系数、叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)、植被指数、生物量、株高、光合色素含量等是常用的参数^[12]。在反

演作物长势参数方面,解析方法主要有基于经验统计回归与机器学习的方法;以影像形态特征和光谱特征进行模式识别的解析方法;以叶片冠层结构和生化参数模拟反射率的模型分析方法以及基于多源数据结合的分析方法.高林等^[13]利用遥感数据获得了高精度大豆LAI预测值.根据作物的生理特性,在红波段、红边波段和近红外波段,其光谱反射特征与长势具有显著相关性,因此可以通过多光谱获得的影像数据与地面实测数据建立回归模型反演作物表型参数.陈鹏等^[14]利用无人机多光谱影像,将影像中的光谱信息和纹理信息融合成新的综合指标估算了马铃薯叶绿素含量,综合指标模型比单一植被指数模型均方根误差降低2.3%.Bian等人^[15]采用无人机以多光谱相机和热红外相机为传感器,获得多种植被指数和水分胁迫率,为精准灌溉提供科学依据.Hassan等人^[16]在无人机上搭载微型红杉传感器,研究了32个在不同灌溉条件下的小麦品种和育种情况,监测小麦整个生命周期的NDVI.高光谱的高分辨率可提供更丰富和连续的数据信息,裴浩杰等人^[17]以高光谱相机为传感器,将叶面积指数、叶片叶绿素含量、植株氮含量、植株水分含量和生物量这5个指标综合建立的新指标反演的模型精度较高,模型的标准均方根误差最低仅为0.038.高林等^[18]在冬小麦试验田中利用Cubert UHD185 Firefly成像光谱仪进行空地联合试验估测冬小麦LAI,获取了精细的光谱特征信息,研究发现458~830 nm波段光谱质量更优.陶慧林等人^[19]采用无人机高光谱数据分析了不同生育期的指数和长势监测指标的相关性,成功反演了冬小麦长势监测图.高光谱成像和参数成图技术可以实现区域范围作物生物理化参数空间分布状况的反演,为精准农业决策提供可靠的依据,但当前参数图是基于半经验关系建立的预测模型,具有一定的时空限制性;另外,无人机搭载高光谱需要权衡空间、光谱分辨率与覆盖范围的关系才能获取目标的细微特征信息.

2.2 作物产量估测

及时预测作物产量可为经营者管理种植模式和制定作物政策提供可靠支撑,已成为精准农业发展的迫切需求之一^[20].无人机低空遥感估测作物产量主要是通过获取作物在关键生长期的植被指数、水分含量、高度信息等建立回归模型来实现^[21].赵晓庆等^[22]利用多旋翼无人机搭载成像高光谱传感器监测系统,获取了不同生育期的不同光谱空间尺度下的大豆高光谱数据构建植被指数,采用最小二乘法建立产量和植被指数之间的回归模型,相关性高达0.811 7.在冬小麦的产量估测方面,朱婉雪等^[23]通过最小二乘法构建了基于不同植被指数与冬小麦实测产量的9种线性模型,相关性较好,最优估算指数为EVI2. Md等^[24]利用无人机遥感获取水稻RGB图像,利用多种图像处理方式分割提取水稻,通过水稻米粒的面积来估测该地区的水稻产量,该方法人工提取特征的误差较大.Zhang Meina等^[25]提出了一种将RGB与CIR光谱图像融合预测棉花产量的方法,基于全景图像提取并计算了色度、植株覆盖率与归一化植被指数3个特征参数构建预测模型,估计值与实际值之间的平均绝对误差百分比为4.0%.当前在农作物产量估测方面,涉及到的农作物较少,多集中在水稻、小麦、大豆等作物,大多数是通过建立回归模型的方式分析相关性进行估测,在作物的不同生育期差异性明显,精度相对较低.在今后的研究中,需要融合作物多方面的生长参数,建立适用于特定作物的估测模型.

2.3 作物氮素诊断

作物正常生长离不开氮、磷、钾等营养元素,尤其是氮素,决定着作物的光合能力和同化产物能力,因此氮肥的管理是提高作物产量、增强品质的重要过程之一.无人机高光谱遥感监测作物氮素主要是通过反演叶片颜色、叶绿素水平、水分含量等的变化导致的冠层光谱差异来获取作物生物理化参数空间分布状况.在氮素诊断研究中以水稻、冬小麦和玉米等粮食作物为主.在水稻田的精准施肥管理上,秦占飞等^[26]利用成像高光谱数据结合统计分析及遥感参数成图技术,反演区域尺度水稻氮素含量的空间分布,均方根误差仅有0.329.在玉米、小麦等作物营养快速诊断过程中,魏鹏飞等^[27]在玉米种植基地分别采集无人机多光谱影像和实测叶片氮含量数据,建立的回归模型 R^2 均高于0.5,实现了对夏玉米叶片氮含量的高精度监测.Liu等人^[28]基于无人机高光谱系统获取小麦冠层图像,结合人工神经网络法建立了小麦叶片氮素反演模型,可预测小麦不同时期的叶片氮浓度.Jay等^[29]利用无人机光谱获取甜菜冠层影像,对甜菜冠层氮含量进行反演.目前针对营养素监测研究大多集中在构建作物氮素营养指标的反演模型上,而针对作物氮素营养指标信息的基础反演以及如何判断氮素亏缺状况和针对无人机影像图设计变量施肥方法等的研究较少,因此基于无人机影像的氮素施肥推荐方法和模型尚需进一步的探索;基于无人机高光谱成像遥感监测作物氮素反演过程中复杂的生化组分如木质素、淀粉等导致光谱吸收特征重叠也会影响氮素含量的估测.

2.4 作物病虫害监测

根据联合国粮农组织统计,每年因病虫害导致的作物产量损失达30%以上,严重情况下甚至会导致作物绝产^[30].快速监测大范围病虫害并采取有效的补救措施尤为重要,无人机低空遥感运行成本低、灵活性高和获取数据实时性强的特点使其在作物病虫害大面积范围的快速检测中具有不可比拟的优势^[31].薛金利等^[32]借助无人机搭载光谱获取不同低空分辨率的棉花苗期影像,利用YOLOv3模型对棉田杂草进行了识别,识别率高达94.06%.Gome等人^[33]借助无人机遥感图像实现了小麦生长区内杂草的识别,并根据识别结果对杂草进行控制.在农业遥感中,众多学者通过分析农作物生长信息的敏感波段,借助多光谱近红外区域和红边区域的特点来监测作物病虫害^[34].Hunt等^[35]利用六旋翼无人机搭载多光谱相机获取了马铃薯冠层影像信息,利用基于面向对象的分析方法准确判定马铃薯甲虫危害程度.高光谱遥感检测病虫害的原理是通过解析发生病虫害的反射光谱和正常健康作物反射光谱的差异来实现,兰玉彬等^[36]在获取无人机低空柑橘果园高光谱影像后,对健康植株和感染黄龙病的植株冠层感兴趣区域处理实现对黄龙病的诊断,对测试集的误判率仅为3.36%.利用无人机遥感技术对作物病虫害信息的研究大多集中在对影像光谱特征和病虫害发生程度的关系解析方面.针对无人机遥感农作物病虫害的早期诊断研究鲜有报道,若要在实际农业生产中推广应用还需将影像数据与气象、水资源等信息结合,解析成可以引导无人机航空植保的作业处方图,并根据不同地区特点制定不同的精准喷施方案.

2.5 作物倒伏状态监测

气候变化和灾害性天气等导致的作物倒伏会降低作物光合作用和结实率,大幅降低作物的产量^[37];此外,倒伏引起的植株损伤为病害传播提供了条件,会再次加重受灾损失^[38],因此对植株倒伏进行有效的监测对减少农作物损失有重要意义.无人机低空遥感影像的光谱、颜色及纹理特征为倒伏监测和倒伏面积计算开辟了新思路.李宗南等^[39]通过无人机遥感获取了倒伏玉米的RGB图像,分析色彩、纹理等特征计算倒伏面积.董锦绘等^[40]将机器学习用于影像分类,利用拼接后的数码影像估算了小麦倒伏面积,误差最小为0.3%.戴建国等^[41]采用无人机多光谱影像分析光谱反射率,建立了棉田倒伏灾害损失评估模型,在测试集上分类结果的准确率为91.30%,AUC值为0.80.Han等^[42]使用无人机获取了倒伏玉米的多光谱和可见光图像,提取纹理、冠层结构、植被指数等参数,构建了2种倒伏面积提取的Logistic模型.张新乐等人^[43]为提高玉米倒伏面积的计算精度,采用无人机多光谱数据逐步提取特征分析差异,构建基于5种典型特征组合的倒伏面积提取方法,对完熟期倒伏玉米的识别具有重要的借鉴意义.

2.6 作物水分胁迫诊断

无人机遥感在恰当的时空分辨率下获取的图像,对精准分析作物所处的农业气象条件、土壤含水率、胁迫参数等的空间变异性及其相互关系具有非常重要的作用,可为大面积农田范围内感知作物缺水空间变异性提供依据.国内外在此方面的研究主要分为基于作物自身参数的水分胁迫诊断方法和基于土壤含水率的诊断方法^[44].在无人机遥感监测土壤水分方面,利用多光谱、高光谱遥感以及多种传感器获取单一或多个波段建立植被指数模型是常用的方法.王敬哲等^[45]采用无人机高光谱获取的影像数据建立了差值指数、比值指数、归一化指数及垂直植被指数与土壤含水率的关系,为干旱区绿洲农田含水率提供了借鉴意义.张智韬等^[46]采用无人机多光谱遥感获取玉米和冬小麦的冠层多光谱正影射图像,并同步采集根域不同深度的土壤含水率,构建了基于机器学习的植被指数与土壤含水率的关系模型,模型 R^2 高于0.851,均方根误差仅为0.7%.针对基于作物自身水分胁迫感知的研究,已经实现了对棉花^[47]、西红柿^[48]、果园^[49]以及葡萄园^[50]等的水分胁迫监测.利用热红外遥感获取作物的温度指数也可以准确表征作物水分胁迫的温度指数或指标.还有学者通过建立基于多光谱特定波段的植被指数来监测作物生理特性和水分胁迫变异信息^[51],常用的有叶黄素、叶绿素和冠层结构指数等,基于此三类指数的水分胁迫研究其田间效果稳定性仍然值得进一步探索.在将无人机低空遥应用于作物水分胁迫监测过程中,需结合地面观测效果,对多源时空信息融合提高精确度和实时性.

3 无人机低空遥感监测农情信息存在的不足和未来发展趋势

3.1 当前无人机低空遥感监测农情信息研究存在的不足

无人机低空遥感在农情监测方面的研究在近十年来呈现指数式增长,总体而言,无人机遥感系统在农情监测推广应用方面取得了众多显著成果,但目前的研究仍存在不足,主要有以下几个方面的问题:

(1) 无人机飞行控制技术在近几年虽然取得了较大发展,但无人机遥感监测过程中的飞行平稳性与智能化水平在面对复杂的作业环境时具有一定局限性。一方面,无人机难以承受较大的载荷能力,自身携带的传感器精度、电池续航能力和通信距离等因素都会影响无人机遥感监测的实用性^[52];另一方面,无人机受外在环境影响较大,在阴雨和多风天气难以开展相应的飞行监测工作,导致其适用性降低。尽管利用滑膜变结构控制和抗干扰技术的飞行控制算法在一定程度上可以应对风力的影响^[53-54],但无人机获取的遥感图像信息抖动和噪点信息较多,需要经过专业性较强和繁琐的预处理过程^[55],处理结果对后续的数据分析及模型反演的精度有较大的影响,这也限制了其在农业中的广泛适用性。

(2) 无人机低空遥感系统搭载的单一传感器难以全面反映田间和作物表型信息,如何将不同遥感信息综合使用,提高监测精度、拓展监测范围还需进一步思考。随着机载传感器的小型化和智能化,已有学者研究多源数据同步监测农田信息,如高林等^[56]采用数码影像和高光谱成像数据相结合的方式,综合估算了玉米生物量。但目前多源数据融合解析作物表型信息的研究还很有限,在复杂的农业环境中,其数据的组合不应局限于两个或多个传感器的融合。韩文霆等^[57]的研究表明空间关系的变化会影响目标解析的特异性,针对田间空间变化可以通过多种方法获得,特别是纳米卫星,也可以通过历史产量图、土壤电导率测量来提取土壤肥力等信息,或基于拖拉机的遥感,将所有这些资源的信息组合,可以为管理决策过程提供一定的辅助作用。如何将成像光谱数据与空间构型数据高效融合以及无人机遥感数据、卫星遥感数据和地面监测数据这类“空-天-地”一体型数据进行融合的应用,仍然需要进一步加强研究。

(3) 在无人机遥感监测农情信息研究中,未能考虑时空变换对作物表型信息获取和解析的影响。在作物生长发育的不同时期,其光谱和纹理特征亦有所不同,而当前基于无人机遥感的农情信息监测研究,大多基于单时段的数据,很少有获取多个连续生长期的作物表型数据,反演参数少、代表性不足,难以准确表达作物的真实长势和指数等参数。因此,对作物生长过程的连续性监测并探寻农情信息的周期性、动态性监测模型很有必要^[58]。无人机低空遥感获取数据后对作物指数反演、产量估测、氮素评估和作物生长胁迫模型的建立往往以经验为主,且针对不同类型的作物表型信息解析需要单独建模,目前还没有人为无人机遥感监测研究开发通用的模型或调整作物的参数库^[6]。尽管众多学者利用植被指数、长势参数等指标通过经验统计回归与机器学习等方法^[8]成功应用于作物覆盖度、株高、倒伏面积、生物量、叶面积指数、冠层温度、水分胁迫等农情信息的解析,但对于大多数作物及其指标而言,模型的稳定性、准确性和普适性还有待进一步研究。此外,针对遥感信息获取的目标分布图和氮素监测水平图等后续进行的精准管理应用研究很少。因此急需开发高效的地物识别、信息提取与解析模型,形成一定的标准和通用方法。

3.2 无人机低空遥感应用前景与发展趋势

3.2.1 农情遥感监测应用的广度和深度不断拓展

无人机遥感监测技术在农情信息获取方面有着显著的优势和广阔的应用前景,已成为高效获取田间和作物表型信息并进行农业现代化管理的重要手段之一。当前无人机遥感监测的研究对象多数集中在玉米、小麦、水稻、棉花、大豆等作物,针对薯类、蔬菜类、林果业的研究较少,并且在研究中包含的作物品种数量少,仅依靠单一作物信息无法实现对复杂农情的信息解析。因此在今后的发展过程中,应不断拓宽无人机遥感在农情信息监测的深度和广度,为低空遥感在精准农业农情信息获取解析中提供更多理论和技术支持。

3.2.2 机载传感设备的低成本、微小型化的研发方向

基于无人机低空遥感在农情信息获取与解析方面取得的巨大优势,如快速的田间取样、高通量和高分辨率的数据类型、长势参数的快速获取、图像快速同步、高效率作业方式等,但当前无人机低空遥感传感设备如高光谱仪、热成像仪等价格昂贵,大大限制了无人机低空遥感信息获取的应用推广。机载传感设备的体积对无人机飞行过程中的续航能力和灵活性影响较大,急需开发成本低、体积小、质量轻和通用性强的机载传感设备,促进无人机低空遥感技术在农业中的推广。

3.2.3 无人机多源数据融合技术的挖掘不断深入

不同波段的传感器在获取信息方面的能力和特点有所不同,无人机多载荷传感器协同观测和数据融合处理技术对于高效反演作物信息,应用于精准农业的日常实践中具有重要意义。以作物病害信息监测为例,遥感数据能够提供面状连续的数据,结合关键地区无人机多光谱数据,则能够提供点状的连续时相的数据^[58]。因此,

未来的研究应集中于利用光谱数据与热数据的互补性,遥感数据与地面观测数据的耦合性,高空卫星和低空光谱数据的匹配性,不断深入挖掘多源数据的融合技术,从而集成观测数据并构建通用性强、精度高、应用广泛的作物信息解析模型,为现代农业精准化管理提供更多坚实的保障。

3.2.4 遥感监测技术标准化和易操作方案的推广

无人机农情遥感信息监测对飞行控制技术、数据的解析建模等操作需要有专业的技术,特别是在热数据和光谱数据方面的处理能力,对技术人员的要求较高。因此需要对处理程序进行标准化和易操作的全流程技术方案的研究与推广,使用户能够自主实现对农情信息的获取和分析,允许非专家用户将无人机操控、光谱和高光谱传感器等数据处理应用于日常操作,进一步扩大无人机低空遥感平台在精准农业中的应用范围。

4 结论

无人机低空遥感作为现代精准农业的重要信息获取方式,可以同时搭载多种不同的传感载荷,经常用于农情遥感监测的机载传感设备主要有RGB相机、多光谱相机、高光谱相机、热成像仪和激光雷达等,其高时效、高分辨率、低成本等特性,在农情信息监测中具有独一无二的优势,已成为精准农业作物表型信息感知与解析的研究热点。在遥感农情监测中通过对作物长势监测、产量估测、氮素诊断、病虫害监测、倒伏监测、作物水分胁迫分析等可为田间管理制定精准作业方案,对于推动现代农业生产具有重要的理论支撑和技术应用价值。

虽然目前基于无人机的农情监测作业已经取得了一定成果,但仍然存在难以满足多样化的用户需求,包括研究广度和深度难以覆盖复杂的农业实际的现状;传感器的高成本和通用性低导致的推广率低;遥感数据的单一性不能完全代表作物的生长信息;数据解析过程的专业性强,还未形成通用性强、易操作的解决方案。毫无疑问的是,无人机遥感技术将继续发展,并进一步扩大其在精准农业中的应用领域。无人机传感器质量和性能以及用户操作友好性的提高趋势将持续下去,将易操作、通用性强、精度高的全套技术解决方案推广到普通用户,使得非专家用户将无人机遥感监测系统应用于日常操作。

参考文献:

- [1] 何勇, 岑海燕, 何立文, 等. 农用无人机技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 232-233.
HE Y, CEN H Y, HE L W, et al. Agricultural UAV technology and application[M]. Beijing: Science Press, 2018: 232-233. (in Chinese)
- [2] 黄亦其, 刘琪, 赵建晔, 等. 基于卷积神经网络的红树林无人机监测研究[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(2): 141-146+189.
HUANG Y Q, LIU Q, ZHAO J Y, et al. Research on unmanned aerial surveillance of mangrove species based on deep convolutional neural network[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(2): 141-146+189. (in Chinese)
- [3] SIEBERTH T, WACKROW R, CHANDLER J H. Automatic detection of blurred images in UAV image sets[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, 122: 1-16.
- [4] 汪沛, 罗锡文, 周志艳, 等. 基于微小型无人机的遥感信息获取关键技术综述[J]. 农业工程学报, 2014, 30(18): 1-12.
WANG P, LUO X W, ZHOU Z Y, et al. Key technology for remote sensing information acquisition based on micro UAV[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(18): 1-12. (in Chinese)
- [5] 李晓鹏, 胡鹏程, 徐照丽, 等. 基于四旋翼无人机快速获取大田植株图像的方法及其应用[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(12): 131-137.
LI X P, HU P C, XU Z L, et al. Method for rapidly acquiring images of field-grown crops using a quad-rotor UAV and its application[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(12): 131-137. (in Chinese)
- [6] 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. 农业工程学报, 2016, 32(24): 98-106.
LIU J G, ZHAO C J, YANG G J, et al. Review of field-based phenotyping by unmanned aerial vehicle remote sensing platform[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(24): 98-106. (in Chinese)
- [7] 赵鹏, 沈庭芝, 单宝堂. 基于CMOS图像传感器的微型无人机遥感系统设计[J]. 光子学报, 2008(8): 1657-1661.
ZHAO P, SHEN T Z, SHAN B T. The application of remote sensing system for micro UAV based on CMOS image sensor[J]. Acta Photonica Sinica, 2008(8): 1657-1661. (in Chinese)
- [8] 刘忠, 万炜, 黄晋宇, 等. 基于无人机遥感的农作物长势关键参数反演研究进展[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24): 60-71.
LIU Z, WAN W, HUANG J Y, et al. Progress on key parameters inversion of crop growth based on unmanned aerial vehicle remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(24): 60-71. (in Chinese)

- [9] AASEN H, BURKART A, BOLTEN A, et al. Generating 3D hyperspectral information with lightweight UAV snapshot cameras for vegetation monitoring: From camera calibration to quality assurance[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 108: 245-259.
- [10] SANTESTEBAN L G, DI S F, HERRERO A, et al. High-resolution UAV-based thermal imaging to estimate the instantaneous and seasonal variability of plant water status within a vineyard[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 183: 49-59.
- [11] 韩文轩, 阿里甫·库尔班, 黄梓桐. 基于改进SSD算法的遥感影像小目标快速检测[J]. *新疆大学学报(自然科学版)(中英文)*, 2020, 37(2): 163-169.
HAN W X, ALIFU K, HUANG Z T. Small-object fast detection in optical remote sensing images based on a modified SSD[J]. *Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese an English)*, 2020, 37(2): 163-169. (in Chinese)
- [12] 邵国敏. 基于无人机多光谱遥感的大田玉米作物系数估算方法研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
SHAO G M. Study on estimation method of field maize crop coefficient based on UAV multi-spectral remote sensing[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018. (in Chinese)
- [13] 高林, 李长春, 王宝山, 等. 基于多源遥感数据的大豆叶面积指数估测精度对比[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(1): 191-200.
GAO L, LI C C, WANG B S, et al. Comparison of precision in retrieving soybean leaf area index based on multi-source remote sensing data[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(1): 191-200. (in Chinese)
- [14] 陈鹏, 冯海宽, 李长春, 等. 无人机影像光谱和纹理融合信息估算马铃薯叶片叶绿素含量[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(11): 63-74.
CHEN P, FENG H K, LI C C, et al. Estimation of chlorophyll content in potato using fusion of texture and spectral features derived from UAV multispectral image[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(11): 63-74. (in Chinese)
- [15] BIAN J, ZHANG Z, CHEN J, et al. Simplified evaluation of cotton water stress using high resolution unmanned aerial vehicle thermal imagery[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(3): 267.
- [16] HASSAN M A, YANG M J, RASHEED A Y, et al. A rapid monitoring of NDVI across the wheat growth cycle for grain yield prediction using a multi-spectral UAV platform[J]. *Plant science: an International Journal of Experimental Plant Biology*, 2019, 282: 95-103.
- [17] 裴浩杰, 冯海宽, 李长春, 等. 基于综合指标的冬小麦长势无人机遥感监测[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(20): 74-82.
PEI H J, FENG H K, LI C C, et al. Remote sensing monitoring of winter wheat growth with UAV based on comprehensive index[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(20): 74-82. (in Chinese)
- [18] 高林, 杨贵军, 于海洋, 等. 基于无人机高光谱遥感的冬小麦叶面积指数反演[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(22): 113-120.
GAO L, YANG G J, YU H Y, et al. Retrieving winter wheat leaf area index based on unmanned aerial vehicle hyperspectral remote sensing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(22): 113-120. (in Chinese)
- [19] 陶惠林, 徐良骥, 冯海宽, 等. 基于无人机高光谱长势指标的冬小麦长势监测[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(2): 180-191.
TAO H L, XU L J, FENG H K, et al. Monitoring of winter wheat growth based on uav hyperspectral growth index[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(2): 180-191. (in Chinese)
- [20] NEUMANN K, VERBURG P H, STEHFEST E, et al. The yield gap of global grain production: A spatial analysis[J]. *Agricultural Systems*, 2010, 103(5): 316-326.
- [21] TEWES A, SCHELLBERG J. Towards remote estimation of radiation use efficiency in maize using UAV-based low-cost camera imagery[J]. *Agronomy*, 2018, 8(2): 16.
- [22] 赵晓庆, 杨贵军, 刘建刚, 等. 基于无人机组高光谱空间尺度优化的大豆育种产量估算[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(1): 110-116.
ZHAO X Q, YANG G J, LIU J G, et al. Estimation of soybean breeding yield based on optimization of spatial scale of UAV hyperspectral image[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(1): 110-116. (in Chinese)
- [23] 朱婉雪, 李仕冀, 张旭博, 等. 基于无人机遥感植被指数优选的田块尺度冬小麦估产[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(11): 78-86.
ZHU W X, LI S J, ZHANG X B, et al. Estimation of winter wheat yield using optimal vegetation indices from unmanned aerial vehicle remote sensing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(11): 78-86. (in Chinese)
- [24] MD N R, SEOP N, SUN W B, et al. Rice yield estimation based on K-means clustering with graph-cut segmentation using low-altitude UAV images[J]. *Biosystems Engineering*, 2019, 177: 109-121.
- [25] ZHANG M N, FENG A J, ZHOU J F, et al. Cotton yield prediction using remote visual and spectral images captured by UAV system[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(5): 91-98.
- [26] 秦占飞, 常庆瑞, 谢宝妮, 等. 基于无人机高光谱影像的引黄灌区水稻叶片全氮含量估测[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(23): 77-85.

- QIN Z F, CHANG Q R, XIE B N, et al. Rice leaf nitrogen content estimation based on hyperspectral imagery of UAV in Yellow River diversion irrigation district[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(23): 77-85. (in Chinese)
- [27] 魏鹏飞, 徐新刚, 李中元, 等. 基于无人机多光谱影像的夏玉米叶片氮含量遥感估测[J]. 农业工程学报, 2019, 35(8): 126-133.
- WEI P F, XU X G, LI Z Y, et al. Remote sensing estimation of nitrogen content in summer maize leaves based on multispectral images of UAV[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(8): 126-133. (in Chinese)
- [28] LIU H Y, ZHU H C, WANG P. Quantitative modeling for leaf nitrogen content of winter wheat using UAV-based hyper-spectral data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2017, 38(8/9/10): 2117-2134.
- [29] JAY S, MAUPAS F, BENDOULA R, et al. Retrieving LAI, chlorophyll and nitrogen contents in sugar beet crops from multi-angular optical remote sensing: Comparison of vegetation indices and PROSAIL inversion for field phenotyping[J]. Field Crops Research, 2017, 210: 33-46.
- [30] 贾少鹏, 高红菊, 杭潇. 基于深度学习的农作物病虫害图像识别技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2019, 50(S1): 313-317.
- JIA S P, GAO H J, HANG X. Research progress on image recognition technology of crop pests and diseases based on deep learning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(S1): 313-317. (in Chinese)
- [31] 田志伟, 薛新宇, 李林, 等. 植保无人机施药技术研究现状与展望[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(1): 37-45.
- TIAN Z W, XUE X Y, LI L, et al. Research status and prospects of spraying technology of plant-protection unmanned aerial vehicle[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(1): 37-45. (in Chinese)
- [32] 薛金利, 戴建国, 赵庆展, 等. 基于低空无人机影像和YOLOv3实现棉田杂草检测[J]. 石河子大学学报(自然科学), 2019, 37(1): 21-27.
- XUE J L, DAI J G, ZHAO Q Z, et al. Weed detection in cotton field based on low-altitude UAV image and YOLOv3[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science Edition), 2019, 37(1): 21-27. (in Chinese)
- [33] GOME Z-CAND N D, CASTRO A I D, LPEZ-GRANADOS F. Assessing the accuracy of mosaics from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery for precision agriculture purposes in wheat[J]. Precision Agriculture, 2014, 15(1): 44-56.
- [34] JINYA S, CUNJIA L, MATTHEW C, et al. Wheat yellow rust monitoring by learning from multispectral UAV aerial imagery[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 155: 157-166.
- [35] HUNT E R, HIVELEY W D, FUJIKAWA S J, et al. Acquisition of NIR green-blue digital photographs from unmanned aircraft for crop monitoring[J]. Remote Sensing, 2010, 2(1): 290-305.
- [36] 兰玉彬, 朱梓豪, 邓小玲, 等. 基于无人机高光谱遥感的柑橘黄龙病植株的监测与分类[J]. 农业工程学报, 2019, 35(3): 92-100.
- LAN Y B, ZHU Z H, DENG X L, et al. Monitoring and classification of citrus Huanglongbing based on UAV hyperspectral remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(3): 92-100. (in Chinese)
- [37] 周平, 周恺, 刘涛, 等. 水稻倒伏监测研究进展[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(10): 162-168.
- ZHOU P, ZHOU K, LIU T, et al. Process in monitoring research on rice lodging[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(10): 162-168. (in Chinese)
- [38] 赵立新, 李繁茂, 李彦, 等. 基于无人机平台的直立作物倒伏监测研究展望[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(11): 67-72.
- ZHAO L X, LI F M, LI Y, et al. Application prospect of crop lodging monitoring based on UAV platform[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(11): 67-72. (in Chinese)
- [39] 李宗南, 陈仲新, 王利民, 等. 基于小型无人机遥感的玉米倒伏面积提取[J]. 农业工程学报, 2014, 30(19): 207-213.
- LI Z N, CHEN Z X, WANG L M, et al. Area extraction of maize lodging based on remote sensing by small unmanned aerial vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(19): 207-213. (in Chinese)
- [40] 董锦绘, 杨小冬, 高林, 等. 基于无人机遥感影像的冬小麦倒伏面积信息提取[J]. 黑龙江农业科学, 2016(10): 147-152.
- DONG J H, YANG X D, GAO L, et al. Information extraction of lodging area of winter wheat based on UAV remote sensing image[J]. Heilongjiang Agricultural Science, 2016(10): 147-152. (in Chinese)
- [41] 戴建国, 张国顺, 郭鹏, 等. 基于无人机遥感多光谱影像的棉花倒伏信息提取[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 63-70.
- DAI J G, ZHANG G S, GUO P, et al. Information extraction of cotton lodging based on multi-spectral image from UAV remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(2): 63-70. (in Chinese)
- [42] HAN L, YANG G, FENG H, et al. Quantitative identification of maize lodging-Causing feature factors using unmanned aerial vehicle images and a nomogram computation[J]. Remote Sensing, 2018, 10(10): 3-19.
- [43] 张新乐, 官海翔, 刘焕军, 等. 基于无人机多光谱影像的完熟期玉米倒伏面积提取[J]. 农业工程学报, 2019, 35(19): 98-106.

- ZHANG X L, GUAN H X, LIU H J, et al. Extraction of maize lodging area in mature period based on UAV multispectral image[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(19): 98-106. (in Chinese)
- [44] 韩文霆, 张立元, 牛亚晓, 等. 无人机遥感技术在精量灌溉中应用的研究进展[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 1-14.
HAN W T, ZHANG L Y, NIU Y X, et al. Review on UAV remote sensing application in precision irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 1-14. (in Chinese)
- [45] 王敬哲, 丁建丽, 马轩凯, 等. 基于光谱指数的绿洲农田土壤含水率无人机高光谱检测[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 164-172.
WANG J Z, DING J L, MA X K, et al. Detection of soil moisture content based on UAV-derived hyperspectral imagery and spectral index in oasis cropland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 164-172. (in Chinese)
- [46] 张智韬, 谭承轩, 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]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 246-257.
ZHANG Z T, TAN C X, XU C H, et al. Retrieving soil moisture content in field maize root zone based on UAV multispectral remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 246-257. (in Chinese)
- [47] COHEN Y, ALCHANATIS V, SELA E, et al. Crop water status estimation using thermography: multi-year model development using ground-based thermal images[J]. Precision Agriculture, 2015, 16(3): 311-329.
- [48] EGEA G, PADILLA-DIAZ C M, MARTINEZ-GUANTER J, et al. Assessing a crop water stress index derived from aerial thermal imaging and infrared thermometry in super-high density olive orchards[J]. Agricultural Water Management, 2017, 187: 210-221.
- [49] BERNI J A J, ZARCO-TEJADA P J, SEPULCRE-CANT G, et al. Mapping canopy conductance and CWSI in olive orchards using high resolution thermal remote sensing imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(11): 2380-2388.
- [50] ESPINOZA C Z, KHOT L R, SANKARAN S, et al. High resolution multispectral and thermal remote sensing-based water stress assessment in subsurface irrigated grapevines[J]. Remote Sensing, 2017, 9(9): 961.
- [51] DANGWAL N, PATEL N R, KUMARI M, et al. Monitoring of water stress in wheat using multispectral indices derived from Landsat-TM[J]. Geocarto International, 2015, 31(6): 682-693.
- [52] 纪景纯, 赵原, 邹晓娟, 等. 无人机遥感在农田信息监测中的应用进展[J]. 土壤学报, 2019, 56(4): 773-784.
JI J C, ZHAO Y, ZOU X J, et al. Advancement in application of UAV remote sensing to monitoring of farmlands[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(4): 773-784. (in Chinese)
- [53] 张志利. 抗风能力无人机飞行稳定性控制模型仿真研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(2): 115-118.
ZHANG Z L. High wind power stability of UAV flight control simulation model[J]. Computer Simulation, 2017, 34(2): 115-118. (in Chinese)
- [54] 史腾飞. 基于自抗扰算法的四旋翼无人机抗风性能研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2017.
SHI T F. Research on the wind resistant performance of four-rotor unmanned aerial vehicle based on auto disturbances rejection algorithm[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2017. (in Chinese)
- [55] 孙刚, 黄文江, 陈鹏飞, 等. 轻小型无人机多光谱遥感技术应用进展[J]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 1-17.
SUN G, HUANG W J, CHEN P F, et al. Advances in UAV-based multispectral remote sensing applications[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 1-17. (in Chinese)
- [56] 高林, 杨贵军, 李长春, 等. 基于光谱特征与PLSR结合的叶面积指数拟合方法的无人机画幅高光谱遥感应用[J]. 作物学报, 2017, 43(4): 549-557.
GAO L, YANG G J, LI C C, et al. Application of an improved method in retrieving leaf area index combined spectral index with PLSR in Hyperspectral data generated by unmanned aerial vehicle snapshot camera[J]. Acta Agronomica Sinica, 2017, 43(4): 549-557. (in Chinese)
- [57] 韩文霆, 张立元, 张海鑫, 等. 基于无人机遥感与面向对象的田间渠系分布信息提取[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 205-214.
HAN W T, ZHANG L Y, ZHANG H X, et al. Extraction method of sublateral canal distribution information based on UAV remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 205-214. (in Chinese)
- [58] ZHANG J, PU R, HUANG W, et al. Using in-situ hyperspectral data for detecting and discriminating yellow rust disease from nutrient stresses[J]. Field Crops Research, 2012, 134(A203): 165-174.

责任编辑: 赵新科