

The Application of Imaging Techniques in Agricultural Field

Zhiyou Zhang, Peigeng Xie*, Minghua Dai, Pengcheng Zhou

Hunan Agricultural Information and Engineering Institute, Changsha Hunan
Email: zhiyouzhang@sina.com, *1162152586@qq.com

Received: Oct. 25th, 2019; accepted: Nov. 11th, 2019; published: Nov. 18th, 2019

Abstract

Imaging technology has been widely applied to various fields of agricultural production. The application of imaging technology broadened the scope of human cognition and research means, greatly improved production efficiency and save costs, promoted industrial upgrading and accelerated the development process of agricultural modernization and intelligence, which is of great significance to the future intelligent and sustainable development of agriculture. In this paper, we summarized the outstanding research results at home and abroad and elaborate, analyzed the advantages and disadvantages of each imaging technology, and looked forward to the possible application research fields and directions of imaging technology in agricultural field.

Keywords

Imaging Techniques, Thermal Imaging, Spectral Imaging, Fluorescence Imaging, Laser Imaging

成像技术在农业领域中的应用

张智优, 谢培庚*, 戴明华, 周芄成

湖南省农业信息与工程研究所, 湖南 长沙
Email: zhiyouzhang@sina.com, *1162152586@qq.com

收稿日期: 2019年10月25日; 录用日期: 2019年11月11日; 发布日期: 2019年11月18日

摘 要

成像技术已广泛应用到农业生产的诸多领域, 成像技术的应用拓宽了人类的认知范围和研究手段、大大提高了生产效率和节约成本、推动了产业升级、加速了农业现代化智能化的发展进程, 对未来农业的智

*通讯作者。

能化和可持续发展有重要意义。本文综合国内外优秀研究成果,在简要阐述了成像技术的基础上,总结了国内外成像技术在农业生产中的应用情况,分析了各技术的优势和劣势,并展望了成像技术在农业领域上的可能应用研究领域及方向。

关键词

成像技术, 热成像, 光谱成像, 荧光成像, 激光成像

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

21 世纪,是新技术层出不穷和大爆发的时代,在这一宏观发展趋势下,成像技术随新材料、电子技术、计算机技术等高新技术的进步和持续发展不断更新、不断涌现新的类型和形式,使用成本也逐渐降低,与农业、工业等相关方面及技术互相融合和渗透,在各领域的应用也逐渐深入和扩大。目前,成像技术实现了除可见光范围外的红外、紫外、X 射线等光学成像,拓宽了人的感知范围,扩大了成像技术的应用对象。

中国正处于传统农业向现代农业的过渡期,融合各种现代化技术的农业将成为未来发展趋势。成像技术在农业领域的应用可以拓宽人类的认知范围和研究手段、可以大大提高生产效率和节约成本、推动产业升级、加速农业现代化智能化的发展进程,对未来农业的智能化和可持续发展有重要意义。本文在简要阐述了成像技术的基础上,总结了国内外成像技术在农业生产中的应用情况,分析了各技术的优势和劣势,为未来拓宽成像技术在农业领域上的可能应用研究领域及方向提供技术参考。

2. 成像技术概述

人类视觉的形成是由视网膜上的感光细胞将光信号转换成神经信号,传入大脑进行处理。成像技术类似于人类视觉,是电荷耦合设备(charge-coupled device, CCD)捕捉一定波长范围的电磁波将光信号转换到电信号,并量化记录进入电脑处理。根据发光机理、检测波段和成像方式的不同,成像技术可分为热成像技术、可见光成像技术、光谱成像技术、荧光成像技术、激光成像技术等,如表 1 所示。

3. 成像技术分类及其在农业上的应用

3.1. 可见光成像技术及其在农业上的应用

可见光成像技术,是利用可见光相机拍摄可见光波段的图像信息,然后进行分析处理的技术,具有直观便捷、成本低和易维护等优点。通过对文献的整理和分类发现,与人眼所能感知到的波长(400~780 nm)范围类似的可见光成像技术适合于对形状、大小、颜色和纹理等较为显著的目标外部特征进行分析,我们可通过获取样本的外观颜色、形状大小和表面纹理特征等来研究作物的根系结构、叶形态、穗形状及穗粒特征、产量特征等[8],来检测和诊断已经表现出明显病症的农作物病害、来检测农产品的感观品质等。

3.2. 热成像技术及其在农业上的应用

热成像技术,又称红外成像技术,通过红外探测器收集待测对象的辐射信息,然后将被测生物体发射出的红外辐射分布转变为红外热图像,并分析生物体自身各部分热辐射的图像差异来研究目标物体的特征信息,其应用原理如图 1 所示[9]。

Table 1. Comparison of imaging technologies
表 1. 成像技术比较

| 成像技术 | 波长 | 主要设备 | 特点 | 参考文献 |
|---------|---|----------------------------------|---------------------------------|--------|
| 可见光成像技术 | 400~780 nm | 可见光相机 | 直观便捷、成本低和易维护等特点 | [1][2] |
| 热成像技术 | 0.76~3 um、3~6 um、6~15 um、15~1000 um | 热红外成像仪 | 大面积、远距离检测, 测量速度快、测量精度高 | [3][4] |
| 光谱成像技术 | 400~2500 nm | 多光谱相机、或高光谱仪(CCD相机)、或超光谱成像仪(HSI)等 | 光谱分辨率高、图谱合一 | [5] |
| 荧光成像技术 | 激发光主要有以下四个波段: 蓝光(波长 435~480 nm)、红光(波长 640~780 nm)、绿光(波长 500~560 nm)、紫外光(280~315 nm) | 荧光成像仪等 | 重复性好、操作简单、使用便捷 | [6] |
| 激光成像技术 | 蓝紫色(405nm), 蓝色(445 nm、460 nm、473 nm), 绿色(532 nm), 黄色(589 nm)和红色(635 nm, 650 nm) | 激光发射器、光电探测器等 | 激光波长集中亮度高、透视能力强, 主动照明成像、能适应复杂环境 | [7] |

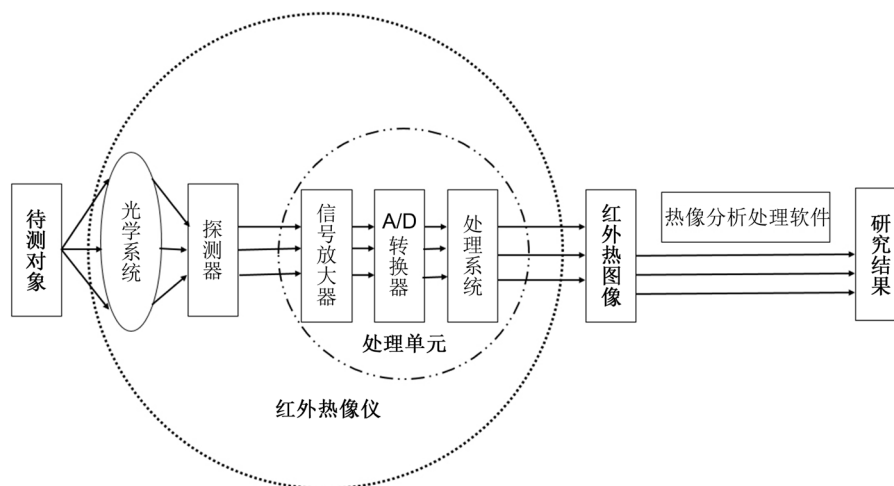


Figure 1. The application diagram of thermal imaging technology
图 1. 热成像技术应用图

热成像技术在农业上, 主要适用于监测农作物生长状态[8]、监测逆境(干旱、高温、低温等)胁迫下的作物生理响应[9][10]、检测农作物早期病虫害[11]、鉴定作物的抗性与筛选抗性材料[12][13][14][15]、估测作物产量、检测农产品品质, 以及农业机器人的避障或识别等方面[16]。

热成像技术应用主要优势有: ① 不接触目标对象检测, 对其无损伤; ② 能实现大面积、远距离的检测; ③ 测量速度相对较快、测量精度相对较高; ④ 与可见光成像技术相比, 环境适应性相对较强, 能全天候工作。

该技术应用的局限性在于: 首先, 成像系统易受环境影响较大, 尤其是在复杂的环境中难以实现精确的测量; 其次, 该技术是利用物体不同部分表面的红外辐射差异成像, 因此对在常温下各部分温度差异不明显的目标难以准确成像; 再次, 该技术对温度不稳定的物质的检测能力较弱; 另外, 红外成像仪比同级别的可见光摄像头的价格相对较高。

热成像技术的分析结果准确性受温度等多种因素的影响,从复杂、重叠、变动的背景中提取弱信息,干扰因素比较多,需要不断改进研究方法、或结合其他成像技术及相关分析方法来弥补热成像技术的分析结果的不足,扩大其应用前景和应用范围。

3.3. 光谱成像技术及其在农业上的应用

3.3.1. 光谱成像技术原理及分类

光谱成像技术,是利用目标对象的分光反射(吸收)率在不同波段域内敏感度不同这一特性,采用多个光谱通道对其进行图像采集、显示、处理和分析解释的技术。光谱成像技术因其获得光谱成像数据包包含目标的两维空间信息(每个波段的二维图像信息)和一维光谱信息(每个像素点的光谱信息),既能可视化分析研究对象的外部特征,又能定量检测内部有效成分。

针对传感器的光谱分辨率和波段数量的不同,光谱成像技术可分为:多光谱成像(Multispectral imaging)技术(一般只可以采集几十个波段的图像信息,获取的光谱信息比较少,光谱分辨率只能达到 $10^{-1} \lambda$ 数量级),高光谱成像(Hyperspectral imaging, HSI)技术(可以采集上百个光谱波段的图像信息,获取的光谱信息比较丰富,分辨率可以达到 $10^{-2} \lambda$ 数量级)以及超光谱成像(Ultra-spectral imaging)技术(获取的图像数据超过 1000 个谱段,分辨率可以达到 $10^{-3} \lambda$ 数量级),它们的区别如表 2 所示。

Table 2. Comparison of three spectral imaging techniques

表 2. 三种光谱成像技术的比较

| 分类 | 光谱分辨率 | 光谱通道数 | 特点 | 优势 | 应用缺陷 | 参考文献 |
|-------------------------|----------------------|-------------|---|--------------------------------|---|--------------------------------|
| 多光谱 (Multispectral) | $10^{-1} \lambda$ 量级 | 5~30 | 光谱波段是离散的、不连续的、不规则的;结构简单、通道数少,计算量相对较小、处理速度相对较快 | 采集时间短,数据简单,易于传输、保存和处理,组成和操作成本低 | 所获信息量相对较少、所测准确度相对较低、对复杂环境适应性较弱 | [17] [18] [19] [20] |
| 高光谱 (Hyperspectral) | $10^{-2} \lambda$ 量级 | 100~200 | 光谱范围宽、连续成像、数据采集时间相对较长、分析速度相对较慢 | 超多波段、光谱分辨率高和图谱合一 | 成像仪获取的信息冗杂、图像处理程序繁杂、高光谱数据量较大、建模和数据处理消耗时间较长、高光谱仪设备比较昂贵 | [19] [21] [22] [23] [24] |
| 超光谱 (Ultra-spectral) | $10^{-3} \lambda$ 量级 | 1000~10,000 | 光谱分辨率高、光谱范围宽、连续成像、图谱合一 | 更高的光谱分辨率,具有更强的适应性 | 设备比较昂贵 | [20] [25] [26] |

3.3.2. 多光谱成像技术及其在农业上的应用

多光谱成像技术是一种通过多光谱成像仪把入射的全波段或宽波段的光信号分成若干个窄波段的光束,且把它们分别成像在相应的探测器上来获得不同光谱波段的图像,然后进行处理、和分析解释的技术。

多光谱成像技术结合了波谱学分析技术(特征敏感波段提取)和模式检测(数字图像处理)技术的长处,弥补了可见光成像技术波段区域范围窄的缺点。因其具有信息采集时间短,数据结构简单,易于传输、保存和处理,以及组成和操作成本低等优点,国内外研究人员在农业领域中用多光谱成像技术开展了大量研究,如区分萌发和正常种子[27]、去除杂质[28]、鉴别品种[29] [30]、农产品品质检测、作物病害诊断鉴定与监测[31] [32]、作物长势及产量监测[33]、作物营养元素监测与诊断[34]等。

多光谱成像技术应用劣势是所获信息量较高光谱成像技术少、所测准确度较高光谱成像技术低、对复杂环境适应性较弱,因此应用多光谱成像技术时,有必要通过不断地改进编码条件,尽量挖掘有利于光谱分类的有效特征信息,来提高编码识别分类的效果;有必要通过研究建立自动化的算法选择和感兴趣区域选择及建模方法,来提高提升运算速度和准确度,提高普适性。

3.3.3. 高光谱成像技术及其在农业上的应用

高光谱成像技术是指利用仪器在特定光谱域(紫外、可见光、近红外、中红外以至热红外区域)以高光谱分辨率(光谱分辨率 ≤ 10 nm 以下)获取连续性地物光谱图像的技术。高光谱成像仪获取得到的高光谱图像具有较高的空间分辨率和较高的光谱分辨率,因此,高光谱成像技术能同时获得研究对象的光谱及空间信息,是一种光谱及图像的融合技术。

高光谱成像技术将传统的二维成像技术和光谱技术有机结合,可获得大量包含连续波长光谱信息的图像块,克服了多光谱成像系统探测波段有限、谱系断裂等原因造成的光谱信息缺失问题,具有超多波段、光谱分辨率高和图谱合一等优点。高光谱成像技术在农业上主要用来检测作物生理信息、检测作物成份含量或元素含量信息[35] [36]、检测作物生产信息、观测作物表型等生长信息[37]、检测作物种子相关信息[38] [39] [40]、检测果蔬等农产品的内外品质[41] [42]、检测农产农残[43] [44]及污染情况[45] [46]、检测果实成熟度[47] [48]以及评级和分选果实、监测和诊断各类作物病虫害[49] [50]、鉴别作物品种[51]、监测土壤含水率、监测土壤含盐量及电导率[52]等方面。

高光谱成像技术应用局限性是:成像仪获取的信息冗杂、图像处理程序繁杂、高光谱数据集较大、高光谱多维数据集需要优化技术来提取相关特征信息、建模和数据处理消耗时间较长、高光谱仪设备比较昂贵等。在未来,为了扩大高光谱成像技术应用范围和深度,应该加强以下三点[41]:一是对高光谱成像技术的相关设备进行改进并升级,提高其数据处理速度、提升其性能,并降低其生产成本和使用成本;二是根据特定应用挑选合适的目标物体高光谱图像特征波长,来降低数据冗余量,减少高光谱图像的获取以及处理时间;三是和其他成像技术或其他技术结合使用,发挥各自技术的优势,弥补自身应用局限。

3.3.4. 超光谱成像技术及其在农业上应用

超光谱成像仪能够在连续光谱段上对同一目标同时成像,可直接反映出被观测物体的光谱特征,甚至物体表面的物质成分。超光谱成像技术的工作波段比多光谱成像技术多,但并不意味前者优于后者,它们各有不同的适用场合。超光谱探测设备因为有更高的光谱分辨率,具有更强的适应性,能应用于多种场合。

超光谱成像技术在农业领域的应用主要有:检测植物病虫害、评价植株生长及生理状态。

3.4. 荧光成像技术及其在农业领域中的发展与应用

荧光是一种光致发光的冷发光现象,当某种常温物质经特定波长的入射光照射,其分子吸收光能后从基态跃迁到激发态后立即退激发回到基态,并发出出射光,这种出射光叫做荧光。荧光成像技术是借助荧光传感器对待测生物体及其器官部位进行成像[6]。荧光成像技术因受温湿度影响小、图像采集不受光照限制、价格合理、重复性好等特点,不仅能提取荧光参数、纹理、荧光强度等信息,还能提取颜色相关的信息进行处理并加以分析,既可用于获取植物内部信息,又能用来检测植物的内部健康状况,还能用来检测土壤内部性质。广大科研人员把荧光成像技术用于对作物生理和逆境胁迫响应机理等研究[53]、对作物病害的检测[54] [55] [56] [57]、对作物营养元素缺乏症状的检测、对植物生理信息及生长状况的检测[58]、对农作物杂草识别和区分[59]、对土壤水分含量检测[60]、对农产品品质的监测与研究[61]等。

荧光技术也存在一定的局限性,如存在暗适应、大田尺度测量难、数据分析方法单一、荧光强度对其成像质量影响较大等问题,此外,荧光强度和環境变化对其成像质量均匀有一定影响。

3.5. 激光成像技术及其在农业领域中的发展与应用

激光成像原理[62] [63] [64]: 激光器产生激光脉冲, 经光学系统发射到一定区域照射目标, 从区域目标反射回来的激光经光学系统汇聚到焦面上的阵列探测器上, 探测器阵列进行光电转换, 将激光信号转换成电脉冲, 电脉冲送到时间鉴别电路, 该电路记录下激光返回信号的时间并进行数字化, 该信息送到信息处理器进行存储、计算出目标距离, 上述过程是探测器阵列上一个像素上发生的情况。因为探测器阵列具有成百上千个像素, 所以一个激光脉冲便可得到一个区域内数千个点的距离或得到目标对象数千个点云信息, 从而得到目标的三维图像。

与红外和可见光等光学成像技术相比, 激光成像有许多独特的优势和特点[62] [63] [64]: 一方面, 激光成像设备通过采集目标表面深度信息、获取目标对象的点云信息, 来得到目标相对完整的空间信息、来形成目标的三维图像, 为目标探测提供足量丰富的特征信息; 另一方面, 激光有一定的透视功能, 因此激光成像设备可以选择性观察不同距离上的目标或者探测复杂环境中的对象目标; 此外由于激光成像设备是主动成像、外部光照条件和目标的(温度等)特性对成像效果影响不大, 所以激光成像技术能适应复杂环境。

激光成像系统能实现低功率、远距离探测, 且随着现在技术成熟, 已经实现集成化、小型化设计, 系统体积小、重量轻, 能满足多种需求。激光波长集中亮度高, 可利用光的丁达尔现象使空气中的水滴、颗粒等成像, 来评价农药雾滴飘移[64]; 运用三维成像特点及优势, 研究人员用它估测植株高度、叶片的方向和倾角、叶形态(大小和面积)、茎的大小等[65]; 研究人员运用激光成像超视距的探测能力来实时监测动植物体内状况; 利用激光成像目标自动识别能力, 科研人员将它用于农业机械或农业机器人的自动导航和障碍规避[66] [67]。

4. 展望

随着社会发展与科学进步, 成像技术将不断提升、改进和融合发展, 成像技术的研究和应用将不断深入, 研究的成果也将层出不穷, 成像技术功能性和便捷性、高效性也会不断体现出来。伴随成像技术应用对象的越来越多, 成像技术在未来的运用也会呈现多元化, 在农业生产中将具有更加广阔的发展空间和应用前景。

基金项目

湖南省农业科学院科技创新项目(2017JC71)。

参考文献

- [1] Zou, X.-B., Zhao, J.-W. and Li, Y.-X. (2007) Apple Color Grading Based on Organization Feature Parameters. *Pattern Recognition Letters*, **28**, 2046-2053. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2007.06.001>
- [2] Zou, X.-B., Zhao, J.-W., Li, Y.-X., et al. (2010) In-Line Detection of Apple Defects Using Three Color Cameras System. *Computers and Electronics in Agriculture*, **70**, 129-134. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.09.014>
- [3] 徐小龙. 基于红外热成像技术的植物病害早期检测的研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [4] 周建民, 周其显, 刘燕德. 红外热成像技术在农业生产中的应用[J]. 农机化研究, 2010, 32(2): 1-4.
- [5] 张若岚, 陈洁. 从单波段到超光谱——面向多维信息感知的红外光谱成像技术[J]. 红外技术, 2014, 36(4): 257-264
- [6] 卢劲竹, 蒋焕煜, 崔笛. 荧光成像技术在植物病害检测的应用研究进展[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 243-252.
- [7] 岳娟. 激光三维成像关键技术[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- [8] 穆金虎, 陈玉泽, 冯慧, 等. 作物育种学领域新的革命: 高通量的表型组学时代[J]. 植物科学学报, 2016, 34(6): 962-971.

- [9] 李真, 史智兴, 王成, 等. 红外热成像技术在作物胁迫检测方面的应用[J]. 农机化研究, 2016, 38(1): 232-237.
- [10] Fuller, M.P. and Wisniewski, M. (1998) The Use of Infrared Thermal Imaging in the Study of Ice Nucleation and Freezing of Plants. *Journal of Thermal Biology*, **23**, 81-89. [https://doi.org/10.1016/S0306-4565\(98\)00013-8](https://doi.org/10.1016/S0306-4565(98)00013-8)
- [11] Wang, M., Ling, N., Zhu, Y.-Y., et al. (2012) Thermographic Visualization of Leaf Response in Cucumber Plants Infected with the Soil-Borne Pathogen *Fusarium oxysporum* f. sp. *Cucumerinum*. *Plant Physiology and Biochemistry*, **61**, 153-161. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.09.015>
- [12] 刘亚. 基于远红外热成像的叶温变化与玉米苗期耐旱性的研究[J]. 中国农业科学, 2009, 42(6): 2192-2201.
- [13] 王冰, 崔日鲜, 王月福. 基于远红外成像技术的花生苗期抗旱性鉴定[J]. 中国油料作物学报, 2011, 33(6): 632-636.
- [14] 王道杰. 油菜抗旱性及鉴定方法与指标[J]. 西北农业学报, 2012, 21(5): 108-113.
- [15] Meron, M., Tsipris, J., Orlov, V., et al. (2010) Crop Water Stress Mapping for Site-Specific Irrigation by Thermal Imagery and Artificial Reference Surfaces. *Precision Agriculture*, **11**, 148-162. <https://doi.org/10.1007/s11119-009-9153-x>
- [16] 徐惠荣, 应义斌. 红外热成像在树上柑桔识别中的应用研究[J]. 红外与毫米波学报, 2004, 23(5): 353-355.
- [17] 李泽东, 李宏宁, 方玉萍, 等. 黄瓜霜霉病害的窄带多光谱图像光谱分类和评估研究[J]. 云南师范大学学报, 2011, 31(6): 63-69.
- [18] 王一杰, 杨智慧, 成军虎. 多光谱成像技术在食品营养品质检测方面的应用进展[J]. 食品工业科技, 2019(9): 1-13.
- [19] 潘锐, 熊勤学, 张文英. 数字图像技术及其在作物表型研究中的应用研究进展[J]. 长江大学学报(自科版), 2016, 13(21): 38-41, 46.
- [20] 许洪. 多光谱、超光谱成像探测关键技术研究[D]: [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 2008.
- [21] Pu, H.-B., Kamruzzaman, M. and Sun, D.-W. (2015) Selection of Feature Wavelengths for Developing Multispectral Imaging Systems for Quality, Safety and Authenticity of Muscle Foods: A Review. *Trends in Food Science and Technology*, **45**, 86-104. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.05.006>
- [22] Lohumi, S., Lee, S., Lee, H., et al. (2015) A Review of Vibrational Spectroscopic Techniques for the Detection of Food Authenticity and Adulteration. *Trends in Food Science & Technology*, **46**, 85-98. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.08.003>
- [23] 桂江生, 吴子娴, 顾敏, 等. 高光谱成像技术在农业中的应用概述[J]. 浙江农业科学, 2017, 58(7): 1101-1105.
- [24] 张巍. 基于高光谱成像技术的蓝莓内部品质检测方法的研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
- [25] Gan, F.-P., Wang, R.-S., Ma, A.-N., et al. (2002) Investigation on Physiological Status of Regional Vegetation Using Push Broom Hyperspectral Imager Data. *Journal of Integrative*, **44**, 983-989.
- [26] Kuska, M., Wahabzada, M., Leucker, M., et al. (2015) Hyperspectral Phenotyping on the Microscopic Scale: Towards Automated Characterization of Plant-Pathogen Interactions. *Plant Methods*, **11**, 1-15. <https://doi.org/10.1186/s13007-015-0073-7>
- [27] Juan, X., Stephen, S., Muhammad, S., et al. (2010) Detection of Sprout Damage in Canada Western Red Spring Wheat with Multiple Wavebands Using Visible/Near-Infrared Hyperspectral Imaging. *Biosystems Engineering*, **106**, 188-194. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.03.010>
- [28] Wallays, C., Missotten, B., De Baerdemaeker, J., et al. (2009) Hyperspectral Waveband Selection for On-Line Measurement of Grain Cleanness. *Biosystems Engineering*, **104**, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.05.011>
- [29] 刘伟, 刘长虹, 郑磊. 基于支持向量机的多光谱成像稻谷品种鉴定[J]. 农业工程学报, 2014, 30(10): 145-151.
- [30] 许学, 马卉, 王钰, 等. 基于多光谱成像技术的小麦品种快速无损鉴定[J]. 中国农学通报, 2019, 35(15): 14-19.
- [31] 冯雷, 柴荣耀, 孙光明, 等. 基于多光谱成像技术的水稻叶瘟检测分级方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(10): 2730-2733.
- [32] 孙光明, 杨凯盛, 张传清, 等. 基于多光谱成像技术的大麦赤霉病识别[J]. 农业工程学报, 2009, 25(增刊 2): 204-207.
- [33] 姜伟杰, 孙明. 基于多光谱成像的番茄叶片叶绿素含量预测建模方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(3): 758-761.
- [34] 刘奕彤, 宋玉柱, 马昕宇, 等. 基于多光谱成像技术的玉米氮素营养诊断方法研究[J]. 农机化研究, 2018, 40(2): 148-153.
- [35] 孙俊, 金夏明, 毛罕平, 等. 基于高光谱图像光谱与纹理信息的生菜氮素含量检测[J]. 农业工程学报, 2014,

- 30(10): 167-173.
- [36] 王丽凤, 张长利, 赵越, 等. 高光谱成像技术的玉米叶片氮含量检测模型[J]. 农机化研究, 2017, 11(11): 140-146, 68.
- [37] 冯慧, 熊立仲, 陈国兴, 等. 基于高光谱成像和主成分分析的水稻茎叶分割[J]. 激光生物学报, 2015, 24(1): 31-38.
- [38] 李美凌, 邓飞, 刘颖, 等. 基于高光谱图像的水稻种子活力检测技术研究[J]. 浙江农业学报, 2015, 27(1): 1-6.
- [39] Christian, N., Zhao, G.-P., Nicole, D., *et al.* (2015) Using Hyperspectral Imaging to Determine Germination of Native Australian Plant Seeds. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, **145**, 19-24. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2015.02.015>
- [40] 杨小玲, 由昭红, 成芳. 高光谱成像技术检测玉米种子成熟度[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(12): 4028-4033.
- [41] 贾敏, 欧中华. 高光谱成像技术在果蔬品质检测中的应用[J]. 激光生物学报, 2018, 27(2): 119-126.
- [42] 张保华, 李江波, 樊书祥, 等. 高光谱成像技术在果蔬品质与安全无损检测中的原理及应用[J]. 光谱学光谱分析, 2014, 34(10): 2743-2751.
- [43] 索少增, 刘翠玲, 吴静珠, 等. 高光谱图像技术检测梨表面农药残留试验研究[J]. 食品科学技术学报, 2011, 29(6): 73-77.
- [44] 李增芳, 楚秉泉, 章海亮, 等. 高光谱成像技术无损检测赣南脐橙表面农药残留研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(12): 4034-4038.
- [45] Jiang, J.-B., Qiao, X.-J. and He, R.-Y. (2016) Use of Near-Infrared Hyperspectral Images to Identify Moldy Peanuts. *Journal of Food Engineering*, **169**, 284-290. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.09.013>
- [46] White Noel, D.G., *et al.* (2016) Detection of Fungal Infection and Ochratoxin A Contamination in Stored Barley Using Near-Infrared Hyperspectral Imaging. *Journal of Stored Products Research*, **147**, 162-173. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.03.010>
- [47] Rajkumar, P., Wang, N., Elmasry, G., *et al.* (2012) Studies on Banana Fruit Quality and Maturity Stages Using Hyperspectral Imaging. *Journal of Food Engineering*, **108**, 194-200. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.05.002>
- [48] 薛建新, 张淑娟, 张晶晶. 基于高光谱成像技术的沙金杏成熟度判别[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 300-307.
- [49] Bock, C.H., Poole, G.H., Parker, P.E., *et al.* (2010) Plant Disease Severity Estimated Visually, by Digital Photography and Image Analysis, and by Hyperspectral Imaging. *Critical Reviews in Plant Sciences*, **29**, 59-107. <https://doi.org/10.1080/07352681003617285>
- [50] 梁琨, 杜莹莹, 卢伟, 等. 基于高光谱成像技术的小麦籽粒赤霉病识别[J]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 309-315.
- [51] 李勋兰, 易时来, 何绍兰, 等. 高光谱成像技术的柚类品种鉴别研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(9): 2639-2643.
- [52] 吴龙国. 基于高光谱成像技术的土壤水盐及番茄植株水分诊断机理与模型研究[D]: [博士学位论文]. 银川: 宁夏大学, 2017.
- [53] 王春萍, 雷开荣, 李正国, 等. 低温胁迫对水稻幼苗不同叶龄叶片叶绿素荧光特性的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2012, 21(3): 38-43.
- [54] Pereira, F., Milori, D., Pereira, E.R., *et al.* (2011) Laser-Induced Fluorescence Imaging Method to Monitor Citrus Greening Disease. *Computers and Electronics in Agriculture*, **79**, 90-93. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.08.002>
- [55] Sankaran, S. and Ehsani, R. (2012) Detection of Huanglongbing Disease in Citrus Using Fluorescence Spectroscopy. *Transactions of the ASABE*, **55**, 313-320. <https://doi.org/10.13031/2013.41241>
- [56] 杨昊谕, 于海业, 刘煦, 等. 叶绿素荧光 PCA-SVM 分析的黄瓜病虫害诊断研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(11): 3018-3021.
- [57] 陈兵, 王克如, 李少昆, 等. 病害胁迫对棉叶光谱反射率和叶绿素荧光特性的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 86-93.
- [58] 杨昊谕. 基于叶绿素荧光光谱分析的植物生理信息检测技术研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2010.
- [59] Su, W.-H., Fennimore, S.A. and Slaughter, D.C. (2019) Fluorescence Imaging for Rapid Monitoring of Translocation Behaviour of Systemic Markers in Snap Beans for Automated Crop/Weed Discrimination. *Biosystems Engineering*, **186**, 156-167. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.07.009>
- [60] 张石锐, 董大明, 郑文刚, 等. 农田土壤水分含量的激光诱导荧光光谱表征[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(10): 2623-2627.
- [61] 董佳. 荧光光谱成像技术在中药品质检测中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 暨南大学, 2015.

- [62] 季云飞, 耿林, 冯国旭. 激光成像技术的新发展[J]. 激光与红外, 2015, 45(12): 1413-1417.
- [63] 张文英, 李承道, 等. 作物表型研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [64] 王志翀, 何雄奎, 李天, 等. 基于激光成像技术的农药雾滴飘移评价方法研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 73-79.
- [65] 方圣辉, 汪琳, 周颖, 等. 基于点云的植株表型构建和反射率方向性分析[J]. 激光与红外, 2018, 48(8): 965-972.
- [66] 姜丹, 刘卉, 邱权. 基于 Seekur 的农田机器人激光避障设计与仿真[J]. 农机化研究, 2015, 37(7): 151-155.
- [67] 季宇寒, 徐弘祯, 张漫, 等. 基于激光雷达的农田环境点云采集系统设计[J]. 农业机械学报, 2019(S1): 1-7.