

刁智华,魏玉泉,吴贝贝,等. 基于图像的农业信息演变规律提取现状分析[J]. 江苏农业科学,2017,45(16):8-11.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.16.002

# 基于图像的农业信息演变规律提取现状分析

刁智华<sup>1,2</sup>, 魏玉泉<sup>1,2</sup>, 吴贝贝<sup>1,2</sup>, 毋媛媛<sup>1,2</sup>, 钱晓亮<sup>1,2</sup>, 刁春迎<sup>1,2</sup>

(1. 郑州轻工业学院电气信息工程学院, 河南郑州 450002; 2. 河南省信息化电器重点实验室, 河南郑州 450002)

**摘要:**农作物信息演变规律提取是人们认识农作物生长过程的重要手段,也是人们了解农作物生长状况、精确判断发展阶段、预测发展趋势的重要依据之一。基于演变规律构建的可视化演变模型可以使人们更加直观地了解作物的生长全过程。近年来,基于数字图像处理的检测技术因非接触测量、操作简单、无损伤等特点逐渐得到研究者的重视。本文以基于时间序列的图像检测技术在演变规律提取方面的应用为切入点,全面分析了该技术在农业领域中包括农作物的长势监测、染病程度判断、可视化模型构建 3 个方面的应用现状,总结了该技术研究在农作物演变信息提取中存在的一些问题,并对未来可能的发展方向给出预测性建议,以期为该技术在相关领域的研究提供借鉴与参考。

**关键词:**演变规律;图像特征;检测技术;时间序列;农业信息

**中图分类号:** S126      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1002-1302(2017)16-0008-04

农业在我国有着悠久的发展历史,在农业发展过程中,获取农作物生长过程的相关信息是提高生产管理水平和提高作物产量与质量的重要前提。在传统生产方式中,人们依据长期视觉观察对农作物的长势信息进行了解,并对农业信息发展的规律进行总结,虽然在世代经验的积累与传承下取得了一定的效果,但这种观察方式耗时、耗力,且主观性强、精确性差。同时,有些农业信息的变化具有人类视觉难以捕捉的特点,比如长时间性、细微性、环境不允许性等,这些都为视觉观察带来了困难。近年来,随着计算机技术的发展,图像处理作为一种新的信息检测手段,应用范围越来越广。从以特征提取、模式识别为主要内容的二维图像分析到以构建模型为主的三维空间序列图像应用,走向加入时间特征的多维时间序列图像的演变特征提取,图像处理经历了从静态特征检测到动态演变规律提取的过程。图像处理技术的发展为演变规律分析提供了新的思路。利用数字图像处理技术获取农作物的生长信息,能够做到对信息的定量化描述,精确地表达农业信息状况,为最佳的农作物生长控制方案提供精确的依据,推动农业生产方式向数字化、智能化方向转变,同时依据提取参数进行农业信息的过程反演能够促进现有农业研究方法的改进与完善。

以往基于图像的农业研究基本上集中在如何利用图像进行特定时刻的作物信息提取,以进行作物病虫害的识别。而真正基于时间序列图像来分析作物的生长过程,识别生长阶段,并依据整个生长周期的数据进行演变规律总结,以实现作物生长过程自动识别的研究相对较少。本文旨在结合数字农

业的发展趋势,综合图像处理技术的发展应用,对基于时间序列图像的分析方法在农业信息动态演变过程中的应用研究取得的进展进行归纳和总结。

## 1 演变规律分析现状

农田信息是随时间变化的,在农作物的生长过程中,作物自身的颜色、形状及表面纹理特征,作物病害的病斑大小、形状、颜色及纹理特征,病害部位植株表面的颜色等都具有随时间的延续而发生连续改变的特点,人们把这种因时间的改变而在某一方面与以前有差异的现象称为信息的演变。演变是农作物生长过程中普遍存在的一种现象,在传统农业生产中人们获得这种演变信息主要依赖人类自身的视觉观察,随着图像处理技术在对研究对象的形状、大小、纹理、颜色等特征的深入理解以及提取技术的发展,图像处理技术为农作物演变信息的检测提供了新的技术与手段。利用图像处理技术获得农作物生长状态信息方面的研究在国内外已经取得很大的进展,但主要集中在病害杂草识别、作物外部生长参数提取、作物营养信息监测、作物形态结构的自动识别等基于特定时点图像的特征提取方面,基于时间序列图像集的农作物信息演变过程的研究还相对较少<sup>[1-2]</sup>。得益于计算机运算速度的大幅提升与图像处理技术的进步,从获得的作物生长过程的时间序列图像集中提取作物生长信息的相关技术,逐渐成为近些年研究的热门领域之一。国内外在基于时间序列图像集的特征提取及应用研究方面也取得了少量的成果,大体可以归纳为 3 个方面:农作物长势自动观测、染病程度自动判断、具有可视化效果的植物生长模型构建。

### 1.1 农作物长势自动观测

农作物的长势可以理解为农作物的生长状况与发展趋势,在农业生产中一直是人们关注的重点,它直接关系到农作物后期产量的高低和品质的好坏,也是人们采取相应控制决策的直接依据。作物的长势可以用个体和群体特征来描述,获取作物长势的传统方法是地面调查,现代农业生产中则主要利用遥感技术检测作物的生长状况和趋势<sup>[3]</sup>。随着科学

收稿日期:2016-03-29

基金项目:国家自然科学基金(编号:61501407);河南省科技厅重点科技攻关项目(编号:132102110150);河南省高等学校重点科研项目(编号:15A413006);郑州轻工业学院研究生科技创新基金(编号:2015028)。

作者简介:刁智华(1982—),男,河南商丘人,博士,副教授,主要从事农作物病害识别及精准喷药技术研究。E-mail: diaozhua@163.com。

技术的发展,促进了农作物长势检测理论与手段的不断发展与进步。检测手段由原始的人工实地检测经历遥感技术检测发展到最近的计算机视觉技术检测。利用计算机视觉技术获得的时间序列图像可自动判断田间作物生长状况,相比于原始的人工实地检测在很大程度上减少了农业工作人员的工作量,也减小了人工观察主观性所带来的误差。此外,此方法获得图像的过程可在田间无损进行,能减少对农作物的损害,符合精细农业的要求。相比于遥感技术,它可以减少气象环境条件对图像获取效果的影响,也降低了设备成本,提高了信息的时效性;同时检测对象为单株作物或作物的某个部分,减小了视野范围,提高了观测精确度。因此,基于图像的农作物长势信息检测技术展现了其他检测手段所没有的许多优势,成为近几年研究比较多的技术之一,按现在的研究范围,农作物生长状况的自动检测目标大致可以分为 2 类:作物长势的实时检测和发育期的自动判断。

在整个生长周期内,农作物的株高、茎粗、叶面积、果实大小等参数指标都在不断发生着改变,这些也成为反映作物生长状况与生长规律的重要指标参数。根据作物的视觉特征,作物的株高、茎粗、叶面积是图像特征中视觉特性最显著的参数,因此,这 3 种特征成为人们在分析作物长势中应用最早也是频数最高的 3 个参数。早在 1995 年 Shimizu 等开发出了 1 套自动分析农作物长势的计算机视觉系统,此系统利用相机获得的时间序列图像提取作物茎秆高度变化信息,并计算茎秆高度的变化率,作为作物的生长指标<sup>[4]</sup>。2010 年马彦平开发出 1 套监测冬小麦、玉米生长状况的远程动态监测技术系统,在系统中以数字图像处理技术为手段,综合作物的株高、叶面积等参数指标,完成了计算机自动解析作物的生长状况指标,判断作物的长势<sup>[5]</sup>。2015 年杭腾等在研究番茄长势信息的无损检测技术时,从采集的时间序列图像中提取番茄的茎粗、株高、叶面积等参数,通过相关性分析建立了番茄长势与时间序列图像特征值之间的拟合函数模型,做到了依据采集的时间序列图像分析作物长势的目的<sup>[6]</sup>。在作物的生长过程中植株的长势状况除了表现在株高、叶面积等方面外,在颜色上也会表现出一定的变化趋势,虽限于人类视觉的分辨能力,这种变化趋势在人工视觉下表现不太明显,依靠人类视觉无法准确判断其中的变化情况,但是利用图像处理技术在高分辨率的图像中,这种颜色的变化趋势很容易计算出来。部分研究者就把研究重点放于颜色特征值的变化,以此来判断作物的长势情况。2002 年 Hiroaki 等提出了 1 种利用图像处理技术监视农作物生长状况的方法,利用图像数据中颜色值的变化与苹果成熟度之间的相关性,提出苹果成熟的诊断模型<sup>[7]</sup>。2015 年杨北方等在研究利用数字图像技术分析棉花长势的过程中,通过采集棉花冠层的数字图像,提取图像的色调值,反映了棉花的长势信息<sup>[8]</sup>。在以株高、叶面积、颜色等所有作物都具有的生长参数作为长势判断依据的同时,不同种作物自身的发育特点,会产生这 3 种参数之外的一些自身特有的生长参数特征,比如玉米在整个周期内是单茎秆无分枝的生长,小麦在发芽后会有个分蘖期,呈丛状生长,此后的生长期仍是单茎秆无分枝的生长,但是番茄就是茎秆不断分枝的生长状态,因此作物自身的生长特点也可成为描述长势的参数。2007 年刘继承在研究利用图像处理技术识别水

稻长势的过程中,以水稻的株高、叶尖距、叶基角数值作为长势的主要判断指标,并结合叶面积指数来获取水稻的长势信息<sup>[9]</sup>。2013 年孙红等充分地考虑了番茄植株的生理特点,在番茄的生长过程中其形态变异表现为“芽”的变化过程,即主茎顶上不断形成多蔓分枝,植株的分枝茎生长角也直接反映了番茄的长势情况,提出了基于图像几何校正的番茄生长角自动测量方法,该方法为快速、无损地获取番茄植株生长形态特征参数,分析番茄的长势提供了新的思考角度<sup>[10]</sup>。

随着研究的不断深入,人们在利用时间序列图像分析作物长势的基础上,逐步总结作物生长规律,并进一步引入自动识别算法来进行农作物生育期的自动观测,以达到能够自动识别农作物各个发展阶段的目的。农作物生育期自动观测是通过定时定点获得农作物整个生育期的图像,提取特征点并结合各时期特征得出各个时期的判断阈值,最终达到通过解读获得的时间序列图像自动判断田间作物生育期状况的目的。在农作物的生长过程中,颜色的变化贯穿整个生长周期,在不同的生育期表现出不同的特点,因此颜色的变化成为人们研究的重要方面。在玉米的生育期研究中,陆明等通过绿色比例判断播种期至大喇叭口期,从抽穗期开始综合黄色和绿色比例判断抽穗、乳熟和成熟等生育期<sup>[11]</sup>。白晓东对水稻分蘖期提出 1 种综合稻穗颜色特征、梯度直方图检测及卷积神经网络检测的水稻抽穗期自动检测方法,在一定程度上克服了因光照引起的叶片颜色变化的影响<sup>[12]</sup>。在作物的不同生长期内,作物的形态特征也表现出较强的不同性,特别是在作物的发育初期至个体植株成熟期,形态特征的变化尤为明显。因此形态特征的不同性成为人们研究作物个体成熟期之前发育期的重要特征参数之一。吴茜根据棉花植株的种植位置具有按行分布的特点,提出了基于直线监测的出苗期自动检测算法,经过幼苗分割、作物行提取,准确地判断出棉花出苗期;采用覆盖度统计的方法对棉花 3 真叶期进行自动检测;结合全局覆盖度和单株植株形态描述的方法提出了 5 真叶期的自动检测算法<sup>[13]</sup>。

综合以上分析可以发现,在作物生长状况分析中,颜色和形态特征的变化是所有作物在生长周期内都有的特征点,因此是人们提取研究的重点。不同作物生长特点的不同,也会引入新的观测特征,此外同种作物不同时期的表征性状也会不同,因此作物生长情况的研究方法也不尽相同,以至于从提取图像特征的生长期自动判别,都没有统一的特征参数。所以,结合生物学充分认识农作物的生长特点,为信息提取选择最优的参数特征显得尤为重要。

## 1.2 染病程度的研究

目前对农作物染病程度的判断主要依赖农业工作人员实地调查,凭借人的眼睛依据特定的技术指标来判断,然而大多数农民并不了解诊断作物病害的确切标准,这样往往会造成误诊率高,识别时间长,易错过最佳防治期,造成病情延误及农药的过量使用。图像识别技术快速、准确、无损伤的特点为病害的发病情况调查提供了新的选择。经过国内外学者的不断努力,在农业领域利用获取的图像通过图像处理技术已经实现了病虫害的有效识别,对病虫害发生程度的定性研究也取得了少量的成果<sup>[14-17]</sup>。在农作物的生长过程中,各种病害

发生症状的表现各不相同且同个病害的症状在不同时期的表现也会较为复杂,但都会引起作物表面形状的改变,在图像特征上大致可分为 3 类:颜色、形状、纹理的变化。这 3 种变化量主要体现在作物本身及病害本身,且这种改变在图像上表现出较强的特征值变化,因此部分学者根据此特点对作物的染病程度进行了研究。马德贵等在研究水稻稻瘟病的发病程度表示方法时,以单株最大病斑为研究对象,采用椭圆拟合单株最大病斑,计算椭圆主长轴的长度,以此来表示稻瘟病的发病程度;用椭圆拟合水稻纹枯病单株最大病斑并计算其最高处距基部的距离,以两者之比值作为对水稻纹枯病病害程度检测的依据<sup>[18]</sup>。葛婧等在玉米小斑病病害程度的检测研究中,利用病斑的彩色图像准确分割出病斑,并计算病斑面积的大小,并以此面积与整叶面积的比值作为受害程度的参考标准<sup>[19]</sup>。郎利影等在研究棉红枯病的染病程度时利用发病叶片中颜色的不同提出了采用红色和绿色分量平均值比值作为染病程度判断的标准<sup>[20]</sup>。李静在研究玉米小斑病的染病程度时,在利用红色和绿色分量平均值的比值的同时,加入红色分量的值为变量建立其与病情指数之间的模型,并取得了较高的精度,同时研究了病斑面积百分率和叶绿素之间的关系,组建回归模型<sup>[21]</sup>。

综合近几年的研究,在利用图像技术分析农作物的病害发病程度中,利用颜色及病斑面积等参数自定义参数指标,初步做到了发病程度的判断。但是在参数选择上以颜色与面积为主,表现力单一,准确率不高,适应性差。且病害程度只是指数的表达,并没有具体的分级标准,对于基于病害整个周期的病害程度分析与总结的研究也比较少。较作物生育期的自动判断来说,病害的自动判断也须引起研究人员的关注。

### 1.3 基于图像的植物生长模型、可视化研究

植物的生长模型构建、可视化研究是虚拟植物技术中一项重要的研究内容,是运用计算机技术结合生物学、应用数学、图形图像学等多学科的,在二维或者三维空间中进行植物形态结构可视化再现的一门技术,是农业科学与计算机技术的交叉领域。植物的可视化生长模型能够以可视化的方式虚拟植物在空间中的形态结构随时间推移的生长发育过程及变化规律,可以使人们对植物的生长过程进行直观的观察研究,发现传统研究方法和技术手段难以观察到的规律,以此来了解植物生长发育的整个过程。随着计算机运算速度的大幅提升、图形图像技术的发展,植物的可视化研究取得了较大的进展并在科研、教学、商业等领域都展现出了巨大的应用价值。如今植物的建模技术可总结为两大类:基于规则的方法和基于图像的方法<sup>[22]</sup>。基于规则的建模方法是根据测量统计的植物生长数据,利用设定的规则标准,通过编写的程序语言来创建植物形态结构模型。在建模中常用的 L 系统和粒子系统就是典型的基于规则的建模算法。在此方法中模型参数的选择是个难点,参数太少不足以表达植物复杂的形态特征,模型真实感不高,参数过多则导致模型复杂、运算量大,不同种类植物间形态结构的较大差异性,也会增加造型的复杂度。由于理论和方法的限制,数学上的模拟只能是对自然结构的一种近似,在形态细节描述方面的表现力较差。基于图像的建模技术是通过场景实拍的一系列图像或视频,恢复出具有较强真实感的场景或者物体模型,由于图像拥有丰富的细节

信息,基于图像构建的模型拥有较强的真实效果,它利用光学仪器获取图像序列集,避免了复杂的数据测量过程。相较于前者,基于图像的建模方法在数据获取、细节展现、建模效率等多个方面都有较大的优势。

近年来,基于图像的建模技术得到了快速发展,经历了从静态到动态,从二维到三维的发展过程,且研究者们已经在静态建模研究中取得了很大的进步与不少的研究成果,为动态建模的研究奠定了理论基础,促进了动态建模的发展<sup>[23]</sup>。2011 年黄兴召利用高清摄像机拍摄了山核桃树不同树龄段的连续图像序列,通过提取摄像机参数及其图像序列的树木三维点云,得到不同树龄段的树木点云模型,进而构建各个树龄段的树木模型,模拟出山核桃动态生长变化的可视过程<sup>[24]</sup>。2012 年徐宏明在研究植物叶片三维模型的重构方法中,利用图像处理技术获取叶片的轮廓信息,提出 1 种根据叶片轮廓自动生成叶片主、二级叶脉的方法,并结合枫叶老化过程中各种色素变化的数学模型,构建了真实感较强的枫叶老化动态模型<sup>[25]</sup>。虽然基于图像的建模技术在细节展现方面有很大的优势,但鉴于在大面积图像展现方面仍然存在计算量大、技术难度高等特点,所以目前单纯的基于图像建模的研究仍以小面积或细节部分的研究为主,整个植株的动态模型构建难度还较大<sup>[26]</sup>。因此,综合 2 种建模方法各自的优缺点,结合规则和图像的双重建模技术成为人们简化计算量的同时又能增加细节表现力的建模手段。此种建模方法是以基于规则的方法建立作物的主干模型,通过图像处理技术获取植物在不同生长期的颜色、形状、纹理等细节特征,耦合到植物的动态生长模型,以增加模型的细节表现力。2008 年吴谦等运用叶片生长异速模型与 Logistic 方程相结合的方法,提出基于图像处理和生长规律的树木叶片动态模型,图像技术的运用使叶片纹理的展现更加细致,模拟效果更加逼真<sup>[27]</sup>。2014 年周贇在花卉的生长形态可视化研究中通过图像处理技术获得各个器官的纹理图像,结合 3 次贝塞尔曲面构造的器官形态,完成了植物形态的可视化表达,并模拟出植株生长的整个过程<sup>[28]</sup>。2015 年马学强在虚拟植物生长模型研究中运用图像处理技术构建了虚拟植物器官模型,结合 L 系统,提出了 1 种自适应的虚拟植物智能生长模型,清晰地展现了植物生长过程中各部分的形态变化与关系<sup>[29]</sup>。

总体来说,基于时间序列图像集的植物模型构建与可视化研究处于起步阶段。限于现在计算机运算速度和图像处理算法的效率性,单纯的基于图像的动态建模技术仅限于小面积、单参数的表面特性展现,而大面积、多参数的整株植物动态模型的构建还存在许多问题亟待解决。所以现在大部分研究仍然是与基于规则建模方法结合使用:以基于规则的建模技术构建植株上细节要求不高的主干结构,来减小模型的运算量,以基于图像的建模技术来构建模型表面的颜色、纹理等细节信息,从而增加模型的细节展现能力、减小测量工作量。

## 2 总结与展望

数字图像处理技术作为一种新兴的检测技术在信息采集方面具有信息量大、速度快、精度高、非接触等优点,对于一些手工测定难以解决的问题有着特别的优势。特别是在农业信息获取中可避免传统依赖人的视觉获取信息主观性强的特点,在节约劳

动力、降低主观性、提高信息精度方面具有很大的潜力。

综合以上分析,基于时间序列图像集的分析技术在农作物的长势分析、发育期自动判断、染病程度判断及植物可视化生长模型的构建等方面引起了研究者的广泛关注并取得了一定的研究成果,在科研、教育、商业领域都展现了巨大的应用潜力。但在实际研究应用中,还存在很多有待投入更多精力加以重点研究的地方。在基于图像处理技术的农业信息演变规律提取与分析的研究中,目前存在的不足之处及未来的研究方向大致可以归纳为以下 4 点:

(1) 现阶段的农作物长势分析和病情判断的大部分研究重点在于定义指数参数描述演变过程,做到依据参数指标人工判断农作物的信息发展情况,对于依据指数参数公式化地表达整个演变过程的研究较少。为促进数字农业的发展,加快农业的智能化进程,农业信息提取的数字化及农业信息演变规律的公式化表达、机器识别与判断是重要的研究方向与内容之一。

(2) 农业信息的数字化提取不应仅仅在于生长状况信息的实时提取,更应注重对提取的生长信息规律的总结,以改变传统农业生产中信息演变规律代代口头相传的形式,使农业生产信息规律能够公式化地普及到每位农业从业人员,使基层的广大农民劳动者能够精确地了解农业信息的发展规律,并能够准确地判断信息发展的每个阶段。

(3) 限于现有图像处理算法运算量大的状况,现阶段植物生长可视化模型的研究仍然以基于规则的建模方法为主,图像只是作为一种辅助手段应用其中,以增强模型的细节表现力,整体模型仍然存在表现力差的特点。因此,改进和优化图像处理算法,以提高算法的运算效率,结合计算机图形学技术促进基于图像的动态模型的改进和推广,是现在面对图像建模技术必须解决的问题。

(4) 对于面向演变规律提取的特有算法的研究较少,面对不同的研究对象的演变规律提取分析须要开发专有的算法,无法实现算法之间的通用。因此,加强演变规律分析算法的研究,完善基于图像的演变规律方法理论,是减小现有演变规律分析的工作量,提高演变规律分析的准确性所必须解决的问题。

总的来说,开展基于时间序列图像集的演变规律分析的理论研究,完善面向规律提取的通用算法,改善与优化现有的图像处理算法,结合生物学优化特征参数的选择,加强公式化表达信息演变过程研究,增进演变规律的公式化总结及演变过程的自动识别算法研究,并结合计算机图形学的最新研究进展,促进基于时间序列图像集的动态可视化模型的研究与发展,可能成为今后一段时间内基于图像的农业信息演变规律分析研究的发展方向。总之,利用时间序列图像集来分析农作物的生长规律具有重要的研究意义及实用价值,它需要多个学科知识的综合运用,大量的试验积累以及新的知识理论算法的构建,才有可能使其研究成果更好地应用于农业科研和生产实践中。

#### 参考文献:

[1] 刁智华. 大田小麦叶部病害智能诊断系统研究与应用[D]. 合肥:中国科学技术大学,2010.  
[2] 刁智华,王欢,宋寅卯,等. 基于颜色和形状特征的棉花害螨图像分割方法[J]. 计算机应用与软件,2013,30(12):177-180,184.

[3] 陈怀亮,李颖,张红卫. 农作物长势遥感监测业务化应用与研究进展[J]. 气象环境与科学,2015,38(1):95-102.  
[4] Shimizu H, Heins R D. Computer vision based system for plant growth analysis[J]. Transactions of the ASAE,1995,38(3):958-964.  
[5] 马彦平. 基于数字图像的冬小麦、玉米长势远程动态监测技术研究[D]. 武汉:华中农业大学,2010.  
[6] 杭腾,毛罕平,张晓东,等. 基于机器视觉的番茄长势信息无损检测的研究[J]. 农机化研究,2015,37(11):192-196,197.  
[7] Hiroaki I, Masahiko T, Toyonori N, et al. Diffuse reflectance near-infrared spectral image measurement for the field monitoring of agricultural products[C]//Instrumentation and Measurement Technology Conference. New York:Proceedings of the 19th IEEE, 2002:3-6.  
[8] 杨北方,韩迎春,毛树春,等. 基于数字图像的棉花长势空间变异分析[J]. 棉花学报,2015,27(6):534-541.  
[9] 刘继承. 基于数字图像处理技术的水稻长势检测研究[D]. 南京:南京农业大学,2007.  
[10] 孙红,李民赞,钱喜艳,等. 基于图像几何校正的番茄茎生长角自动测量技术[J]. 农业机械学报,2013,44(2):209-214.  
[11] 陆明,李茂松,申双和,等. 图像识别技术在作物农情新奇反演中的应用[J]. 自然灾害学报,2011,20(3):18-24.  
[12] 白晓东. 基于图像的水稻关键发育期自动观测技术研究[D]. 武汉:华中科技大学,2014.  
[13] 吴茜. 基于图像处理技术的棉花发育期自动观测研究[D]. 武汉:华中科技大学,2013.  
[14] 胡敏,陈洪波,许良凤,等. 基于颜色和纹理特征的黄瓜病害识别算法[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(7):970-977.  
[15] 夏永泉,李耀斌,黄海鹏. 基于平均影响值和支持向量机的小麦病害识别[J]. 计算机技术与应用,2015,41(6):136-138,142.  
[16] 濮永仙. 基于病斑特征融合的烟草病害图像检索方法[J]. 河南农业科学,2015,44(2):71-76.  
[17] Patil J K, Kumar R. Feature extraction of diseased leaf images[J]. Journal of Signal and Image Processing,2012,3(1):60-63.  
[18] 马德贵,邵陆寿,葛婧,等. 水稻稻瘟病及水稻纹枯病病害程度图像检测[J]. 中国农学通报,2008,24(9):485-489.  
[19] 葛婧,邵陆寿,丁克坚,等. 玉米小斑病病害程度图像检测[J]. 农业机械学报,2008,39(1):114-117.  
[20] 郎利影,陶坚坚. 基于图像处理的棉红枯病染病程度研究[J]. 农机化研究,2012,34(6):161-164.  
[21] 李静. 玉米小斑病的图像处理技术及生理指标的研究[D]. 合肥:安徽农业大学,2007.  
[22] Quan L, Tan P, Zeng G, et al. Image-based plant modeling[J]. ACM Transactions on Graphics,2006,25(3):599-604.  
[23] 刘丹,诸叶平,刘海龙,等. 植物三维可视化研究进展[J]. 中国农业科技导报,2015,17(1):23-31.  
[24] 黄兴召. 基于图像的山核桃生长模型[D]. 浙江:浙江农林大学,2011.  
[25] 徐宏明. 枫叶老化虚拟方法与关键技术研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2012.  
[26] 汪丽萍. 基于生理生态的黄瓜叶色建模与可视化研究[D]. 南昌:江西农业大学,2015.  
[27] 吴谦,张怀清,陈永富,等. 基于生长规律与图像结合的树木叶片动态模拟[J]. 林业科学研究,2008,21(增刊1):122-125.  
[28] 周赞. 高度真实感的观赏植物形态与生长可视化[D]. 北京:北京林业大学,2014.  
[29] 马学强. 具有生长特征的虚拟植物模型研究[D]. 济南:山东师范大学,2015.