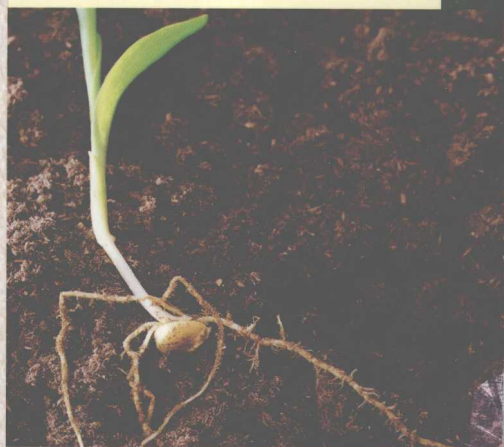


学者书屋系列

植物根系图像 检测分析系统

刘九庆◎编著



哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

学者书屋系列

植物根系图像检测分析系统

刘九庆 编著

哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书是基于计算机视觉技术、机电一体化技术和计算机图像处理技术,针对植物根系图像采集、分析研究编写而成的。本书对 CCD 摄像机标定、图像几何畸变校正、图像拼接、图像边缘检测等方面进行了深入细致的研究,并提出了一种基于分形理论 H 参数计算的改进方法——增容矩阵算法,对提取植物根系轮廓、根系图像分析提出了新的方向。

图书在版编目(CIP)数据

植物根系图像检测分析系统/刘九庆编著. —哈尔滨:
哈尔滨工程大学出版社, 2007. 10
ISBN 978 - 7 - 81133 - 062 - 5

I. 植… II. 刘… III. 植物 - 根系 - 数字图像处理
IV Q944.54 - 39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 158136 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451 - 82519328
传 真 0451 - 82519699
经 销 新华书店
印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂
开 本 787mm × 960mm 1/16
印 张 11
字 数 122 千字
版 次 2007 年 10 月第 1 版
印 次 2007 年 10 月第 1 次印刷
定 价 26.00 元
<http://press.hrbeu.edu.cn>
E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

根系是植物的重要组成部分,是植物生长发育、新陈代谢的主要营养器官。根系形态参数是反映根系生长状况的主要因素,定期测量和分析植物根系形态参数对于了解、研究植物的生长发育状况以及防治病虫害灾害均具有重要意义。但是由于根系生长在地下,准确取样、测定、观察存在一定困难,而且目前现有的挖掘法、整段标本法、剖面法等采样方法,都有采样破坏性和工作量大等缺点,因而阻碍了根系研究的深入开展。

本书是基于计算机视觉技术、机电一体化技术和计算机图像处理技术,针对植物根系图像采集、分析研究而编写的。本书以 CCD 摄像机、图像采集卡、计算机、三自由度根系图像采集运动系统以及根系形态参数分析软件为主体构建而成,适用于植物根系形态监测及其采集分析。这一系统实现了对根系的大视场观测和形态参数的快速准确测量与分析,为研究植物根系提供了一种全新、直观、高效、可靠的研究手段。本书对 CCD 摄像机标定、图像几何畸变校正、图像拼接、图像边缘检测等方面进行了细致深入的研究,提出了一种基于分形理论 H 参数计算的改进方法——增容矩阵算法,用以弥补传统算法图像边缘缺损的缺陷,进而提取植物根系轮廓,在后续的根系图像分析实验中取得了很好的效果。本书主要包括以下几方面内容。

1. 植物根系图像监测分析系统的研究设计。硬件设计包括 CCD 摄像机三自由度精确定位机构的研究设计,电气控制系统的设计,照明系

统以及图像采集传输系统的设计等;软件设计包括根系图像采集,根系图像处理和根系形态参数分析三部分内容。

2.运用数字图像处理技术对所采集的根系图像进行研究,包括根系图像几何畸变校正、根系图像拼接、根系图像边缘检测以及根系图像形态参数计算等方面内容。

3.提出了运用分形理论提取植物根系轮廓的方法,并和传统的 Sobel 算子、Canny 算子进行比较,实验结果表明,分形算法在根系图像边缘提取和噪声抗干扰能力方面优于其他算子。在 H 参数值的计算上本文提出了一种改进的增容矩阵算法,给出了增容矩阵填补规则,实验证明,该算法在根系图像边缘检测中的可行性。

基于计算机视觉技术全自动/手动双功能植物根系全景图像采集处理分析系统(NEFU-PRSAS-01)的研究突破了国内植物根系无损在线监测多项瓶颈。在根系图像摄取范围、操作的灵活性、自动化程度等方面均取得了突破。特别是首次将分形理论应用于植物根系图像轮廓提取。在此基础上开发的软件系统(NEFU-PRSAS-S01)实现了植物根系形态参数自动分析计算,为我国农林业相关领域的科研提供了一种全新的研究手段,为推进我国植物根系研究进行了一次有益的尝试。

本书是在哈尔滨市青年研究基金“植物根系图像监测分析系统的研究”课题资助下研究完成的。

编 者

2007 年 7 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 国内外根系研究现状及发展趋势	3
1.3 数字图像处理技术在植物根系研究中的发展概况	8
1.4 本书的主要内容	21
第 2 章 基于分形理论的植物根系图像边缘检测	23
2.1 引言	23
2.2 分形理论基本概念	24
2.3 分形维	25
2.4 随机分形	30
2.5 基于 DFBR 场模型的图像边缘检测	34
2.6 植物根系图像处理实验结果分析	42
2.7 小结	47
第 3 章 植物根系形态分析及其参数计算	48
3.1 植物根系空间构型	48
3.2 植物根系形态模型原理	49
3.3 植物根系形态参数计算及分析	57
3.4 植物根系形态的动态参数	62
3.5 小结	62

第 4 章 基于傅里叶变换的植物根系图像拼接技术	64
4.1 引言	64
4.2 图像拼接基本思想	64
4.3 根系图像拼接的具体分析	66
4.4 植物根系图像的拼接结果	84
4.5 再投影流形(Re-projection)	90
4.6 小结	93
第 5 章 摄像机标定原理及方法	94
5.1 引言	94
5.2 成像几何模型和多视点几何	96
5.3 传统摄像机标定技术原理和方法	106
5.4 自标定技术原理和方法	111
5.5 根系图像几何畸变校正原理及方法	124
5.6 小结	131
第 6 章 植物根系图像监测分析系统原理及组成	133
6.1 引言	133
6.2 植物根系图像监测分析系统设计原理	133
6.3 植物根系图像监测分析系统组成	135
6.4 摄像机三自由度运动机械系统设计	138
6.5 电气控制系统分析设计	143
6.6 数字 PID 控制器的设计及算法实现	146
6.7 小结	150
结论	153
参考文献	155

第1章 绪论

1.1 研究背景和意义

长期以来,植物学家对植物地上部分器官的结构、功能及叶光系统的调控进行了大量的研究,取得了显著的进展。但是由于研究方法和工作条件等原因,对植物地下根系的研究远远落后于地上部分。随着科学技术的发展,根系研究方法也在不断地改进和完善,对根系的研究也越来越深入。近年来,国外将根系的形态构造、生理特性、生态型及品种间的差异及环境因素等对根系的影响进行了深入的研究,同时对根系吸水机理也进行了研究,并建立了理论、半理论和半经验及经验模型来描述根系吸水状况。随着全球气候变化研究的开展和区域尺度及全球尺度的土壤—植被—大气系统的能量和物质传输都需要借助于模型模拟的手段,而植被群落的根系和分布正是这些大尺度模型中的必要参数。国内对根系的研究晚于国外,但也做了大量的工作^[1]。

根系研究是植物营养学、植物生理学等学科的重要课题之一,而根系形态分析则是根系研究的重要内容。对根系形态基本参数及根构型参数的准确测定是根系形态分析的前提和关键。过去观测手段的缺乏,制约了对其研究的深入发展。近年来,由于光电数码科技及计算机技术的飞速发展以及植物学研究的迫切需求,并受人体内窥镜技术的启发,根系活体实时检测成为可能并逐步变为现实^[2,3],但是,在观测方法及观

测精度等方面一直还存在问题。因此本课题研究了植物根系图像监测分析系统,此系统是由 CCD 摄像机三维精确定位机构、透明管、图像采集系统、根系形态参数分析软件组成的光机电控一体化集成系统(包括硬件系统和软件系统)。

根是植物为适应陆地上生活而逐渐形成的器官,它具有吸收、固着、输导、合成、储藏和繁殖等功能。根系一般是植物体生长在地面下的营养器官,土壤内的水和矿物质都是通过根进入植物的各个部分。它的顶端能最大限度地向地下生长,它的内部能生长出侧向的支根,从而形成庞大的根系,这样有利于植物体的固着、营养吸收,同时这也是促使植物体的地上部分能完善地生长,达到枝叶繁茂,花果累累的原因^[4,5]。由此可见,根的正常生长对植物的健康生长起着关键的作用,通过本课题的研究可以得到根系生长状况的关键数据,从而为研究实现植物保持最佳生长状态的方法提供实验参数和手段。

高新技术的应用是促进我国农、林业发展的关键,本课题适应时代之要求,充分利用计算机、数字图像处理技术、CCD 摄像技术以及新的处理算法实现对植物生长过程中根系的计算机监控。本课题研究成果在借鉴国外技术的同时也有自己的创新,从而解决常规技术难以解决的问题,达到常规技术所达不到的优异性能。植物根系生长状况的监测系统是中国数字领域的一个崭新应用^[6,7],它利用 CCD 摄像系统采集根系图像,并通过图像采集卡将根系图像以数字信号的形式存储在计算机的硬盘中,利用所编写的图像处理软件对其进行分析,提取植物根系的特征值,如长度、根表面积、平均直径、根长密度、根表面积密度等。它的研究成功将促进农、林业的发展,为植物根系研究增添新的观测手段。

1.2 国内外根系研究现状及发展趋势

根作为植物三大器官之一,在植物的生长发育过程中起着极为重要的作用。目前,国际上也将根系研究作为进一步提高农林植物生产率的一个极具潜力的基础性科研课题。与此同时,促使人们对根系领域进行详尽研究的另一个重要原因是近现代测试技术和研究方法有了长足的进步。

鉴于根系在植被系统中的重要作用,人类很早以前就开始了根系的研究,有文献记载的首次提到对根系的研究是 Hales 于 1727 年对不同植物品种根系在土壤中分布的描述。随着对根系研究的深入,研究方法和水平也在不断改进和发展,从用水冲洗土壤剖面到用透明管壁观察根系生长,再至正规的根系取样,经历了漫长的发展历程。20 世纪 50 年代开展的示踪技术为评价根系的功能提供了强有力的手段。这些技术包括放射性同位素、稳定性同位素和稳定性示踪物等。最近发展起来的数字图像处理技术使在田间观测根系的生长和形态成为可能,计算机技术的发展使分析根系更快、更详细。Bohm 将对植物根系的研究方法分为七类:挖掘法、整段标本法、土钻法、剖面法、玻璃壁法、间接方法、容器法。这些方法可以归结为:田间直接方法,如挖掘法、整段标本法、土钻法、剖面法;直接观察方法,如透明管法包括微型根系观测管、根系研究室等;间接观察方法,如同位素示踪、稳定示踪物等方法。用不同的方法进行实验得到的结果往往会存在差异。

1.2.1 根系田间观测法

1. 冲洗法

在田间挖出包含植物根系的整个土体后,将土体装入特制的金属网淘洗设备中,用射流自来水小心地将根系与土粒分离,直至根泥完全分离,获得实体根系为止。美国依阿华大学的 Dittmerk 采用这种方法研究黑麦根系获得了大量有价值的观测数据。冲洗法的不利之处,一是易造成根,特别是具有活力的幼根的损失;二是难于分清植物的活根与死根,有时可能还含有杂草及其他植物的根。

2. 壕法

Weaver 在接近田间植物根部附近挖掘壕沟,从外围仔细向根系分布区域以内挖,并用铁丝钩和镊子将土粒逐粒剔除,把挖出和剔除的土壤放在根系区域以外,并设置框架将根按原来位置一一固定,直至全部根系完全裸露固定为止。

3. 框架法

我国著名水稻专家丁颖在研究水稻根系时即用此法,其具体做法是在未植稻前预先在田间挖一方形坑,然后将多层铁丝网框架埋设在根系可能伸展到的土体内,再以土充实方坑,让根系在框架内生长,待测定时再逐次剔除土壤,而预先埋设的铁丝网框架则起固定支撑根系的作用,以此获得田间根系实体的分布状况。

4. 玻璃墙法

在根系生长一侧的纵切面安置一透明玻璃板,玻璃板外再配置一活动的遮光板,使根系在绝大部分时间处在黑暗的条件下生长。当需要对生长中的根系进行观测时,可临时移去遮光板直接对实体进行观测。

采用上述根系研究方法的优点是,能对田间生长的根系进行直接观测;缺点是费工费时,并且不易取得完整的根系和获得可靠的数据。

1.2.2 根系的模拟观测法

1. 根箱法

用容器盛土栽培植物以代替田间观测,即让根系在比田间小得多的容器内生长。供根系研究用的容器有黏土盆,彩釉塑料盆,玻璃或浸有腊或用腊包膜的硬纸板盒。盆的形状有方形、矩形、圆柱形等,通常专门用于根系研究的盆是在一个透明容器外,套上一个稍大的不透明容器,当需要观测时,可将不透明容器移开,待观测后再重新套上。由于容器内根的走向主要与水分的移动方向保持一致,因而在带孔的盆中,根会被浓缩在盆边缘和底孔土体处,而在无孔密实的盆中,根系主要浓缩在盆边缘的土体中。其优点是盆易于挪移,适于同时采用多种土类和设置不同处理,在互不干扰的条件下对根系生长进行研究。采用此法的最大缺点是根系的生长易受容器的限制,另外,这种方法的缺点是难于进行土、根分离。John Innes 曾利用盆栽法进行固液分离获得纯净的土壤溶液,并测定了土壤溶液的成分。

2. 无土栽培

Sachs, Knop 和 Hoagland 等将植物种植在设置有固体支撑装置内含植物必需营养成分的营养液中,或种植在浸润有植物必需营养液的惰性基质中。采用这种方法必须事先对所有用具进行严格的灭菌消毒,根据植物种类配置营养液,并解决供氧问题。采用这种方法的突出优点是,可避免繁琐的根、土分离操作,但用这种方法观测根系的生长状况与田间实际生长状况差异更大。

鉴于土壤与根系难于分离,大多数植物矿质营养生理学家极为赞成这种全然不顾土壤的研究方法,并认为这是一种研究根系水分和矿质营养吸收和输导的最为理想的方法。但这类方法却遭到植物生理学家、土壤学家,特别是土壤微生物学家的非议。这是因为根系在营养液中所依附和生存的微生物类群数量和种类与土壤中的情况是悬殊的,同时生长在营养液中的根的形态、结构和分布也与土壤中的截然不同。Knop 和 Walf 等指出,营养液中根的生长条件与土壤中根的生长条件差异极大,以致无法将两者加以比较。譬如在土壤中生长的根的细胞结构与溶液中生长的根系细胞结构就明显不同,在水培中生长的根系其细胞结构通常比在土壤中生长的更易脆裂。

1.2.3 近代根系研究方法

1. 喷雾法

这是在水培的基础上引伸发展出来的一种方法。喷雾法采用装有能自动连续喷洒雾状营养液的机械系统,该系统由一套自动输液管和喷雾装置构成,植物的根颈被固定在装有苯乙烯泡沫的夹板孔隙中,根系在暗箱中生长。此法与水培法不同之处是氧气供应充足,根部能滋生大量的根毛,而水培法因容器中氧的供应受限,通常根部不生根毛。

2. 放射性示踪法

Hammes 等预先在土壤不同深度埋设放射性稳定的同位素,然后测定根系中的放射性强度;Saverbeck D R 等用放射性 C 作标记、霍尔用放射性 P 作标记,测定根系的分布状态。但采用这种方法必须预先将 P 埋设在土壤中。

3. 放射自显影术

放射自显影术(ARG)利用放射性同位素产生的射线使核子乳胶感光显示样本中放射性物质的分布状态。该方法的优点是能将根的形态、机能和代谢一起研究,同时它还具有示踪定位性强、灵敏度高、分辨率佳和保持时间长,并可在不破坏土体和根细胞结构条件下进行观测等优点。

4. 微速摄影法

它是一种带有光学显微镜的微速摄影装置,通过纤维线将内窥镜插入预先挖有孔洞的孔道中,利用光学显微镜对植物或根部周围土壤进行观测的方法。

5. 核磁共振扫描法

根据核磁共振原理,利用核磁共振仪可直接观测植物根系的整个结构、生长状况和各个部分的生理功能。它既可用于观测根系对水分和养分的吸收和输导,又可以研究根部周围的微域环境。

6. 微根管法

微根管法于1937年被首次提出并应用于微根系生长研究,即以一定的角度向土壤中插入透光性较好的透明管或塑料管,通过管壁与土壤间的界面进行微根系生长全过程原方位无损观察。最初的微根管技术只能实现肉眼观察,经逐渐改进后,通过事先安装于玻璃或透明塑料管中的潜望镜来观察土壤中微根系生长的动态过程。安装袖珍望远镜以放大微根系图像,并配以袖珍相机拍照记录微根系的生长动态过程。在此基础上又开发出许多新的观测手段,包括根潜望镜、内诊镜和小型彩色摄像仪并配备录像带进行自动摄像以观察微根系的动态生长过程。这是一种非破坏性野外观察根系动态的方法。

1.3 数字图像处理技术在植物根系研究中的发展概况

20 世纪 60 年代初,数字图像处理技术已在各行业中得到了广泛的应用。1965 年 Roberts 开创性的工作,即他对“积木世界”的研究分析,使数字图像处理技术开始了伟大的征程。

目前,国外非常重视对植物根系生长特征进行计算机识别的研究,并已有了不同程度的进展,有些技术已经逐渐成熟并开始应用。如美国 Bartz Technology Corporation 公司近年来开发的 BTC I-CAP 系统利用 I-CAP 图像捕捉子系统,选择、捕捉和存储 BTC 摄像系统看到的根系图像,并将每个图形存储在计算机中,系统能存储 20 000 个图像。经过一天的野外工作之后,图像可下载到实验室的计算机中并进行图像的处理、分析、识别特征等工作。美国的 Regent Instruments 公司建于 1991 年,一直从事关于植物根系图像分析系统的研究,近年来又推出了根系测量系统 WinRHIZO,可以在几厘米的区域内利用几秒的时间测出根系的长度,将数码照相机采集到的数字图像直接输入计算机,通过图像处理和分析得到相关数据后,经过反馈将适量化学肥料送往根部,使植物保持良好的生长状态,同时可以定量地研究植物根系随栽培环境变化的生长比率。美国与加拿大的合资公司 CID 于 2003 年 2 月推出的 CI-600 Root Scanner for Root Monitoring,采用可旋转的扫描头伸入土壤中,对根系进行全方位扫描,其图像可达到 180 万像素,目前,可以说在世界上处于领先地位。其他国家,如日本、加拿大、法国、澳大利亚等在此方面都进行了探索性的研究,其中澳大利亚采用 X 射线照相技术将采集到的图像进行

处理^[9]。

随着计算机技术的迅速发展,可利用数字方法及其他有关数字方面的技术对图像进行某种运算和处理,从而达到某种目的。例如使褪色的照片重新变得清晰;从根系图像中提取有意义的根系特征等^[10]。数字图像处理技术的发展始于20世纪60年代初期,1965年Roberts开创性的工作,即他对“积木世界”的研究分析使数字图像处理技术得到应用。20世纪70年代初,数字图像处理技术首先应用于生产和医学中。美国的Hounsfield G N在1971年安装了第一台脑CT,配接X光机的图像处理系统可进行导管标定、血管造影及血管动态分析。通过对X光图像的处理,关节等部分的细节不再难以分辨,人体内的胆结石也可以清楚地显示在电视屏幕上^[11]。而后,在农业生产和研究中,Nakahara首先利用图像处理技术,根据黄瓜的长度、弯曲度来分选黄瓜,Sakar等人根据表面颜色分选西红柿等。但所有这些应用大部分停留在对算法和方法的可行性探索研究上。在近40年的时间里,随着计算机技术、传感技术和视觉信息采集技术的发展,计算机图像处理技术已在各行各业的应用中蓬勃发展,新的概念、新的方法和理论不断涌现。1984年德国科学家利用数字图像处理技术等对森林健康状况进行调查,主要是观察树冠颜色和落叶情况,参照标准照片进行对比。落叶分健康、轻度落叶、中度落叶、严重落叶和死亡五个等级;树冠颜色分健康、轻度、中度和严重四个等级。在公安刑侦方面利用数字图像处理技术也取得了两大突出成果,即指纹的查询、识别,以及人像的组合、查询和识别。尤其在军事领域方面,可将来自卫星的图像进行处理、分析后用于军事侦察,以地形匹配实现精确轰炸,以相关运算实现动态目标跟踪等。由此可见,计算机图像处理技术的研究在许多领域都展示了广阔的、不可估量的应用前景。

1.3.1 图像边缘检测技术发展现状

植物根系边缘检测是本课题中最重要的研究内容之一。传统的图像边缘检测方法大多归结为图像高频分量的增强过程,微分运算自然成了边缘检测和提取的主要手段。人们从而提出了一阶微分边缘算子,如 Robert 算子、Sobel 算子、Prewitt 算子和 Kirsh 算子等。这些算子由于梯度或一阶微分算子通常在图像边缘附近的区域内产生较宽的响应,故采用上述算子检测的边缘图像常需作细化处理,这就影响了边缘定位的精度,因而又产生了与边缘方向无关的二阶微分边缘检测算子,即 Laplacian 算子。利用二阶导数零交叉提取的边缘宽度为一个像素,所得的边缘结果无需细化,有利于边缘的精确定位。

边缘检测的基本问题是检测精度与抗噪性能间的矛盾。由于图像边缘和噪声均为频域中的高频分量,简单的微分运算会增加图像中的噪声,因此在微分运算之前,应采取适当的平滑滤波以减少高频分量中噪声的影响。Canny 应用严格的数学方法对此问题进行了分析^[16],提出了由四个指数函数线性组合形成的最佳边缘检测算子。这一方法的实质是用一个准高斯函数作平滑运算,然后以带方向的一阶微分定位导数最大值。随着平滑滤波技术的日渐完善,平滑二阶微分的边缘检测算子也在近年来得到了应用。这种方法是先对图像作最佳平滑,然后再利用平滑图像的二阶微分零交叉来确定边缘位置^[17]。Marr-Hildreth 认为 LOG 算子是这类边缘检测算子中应用最成功的一种,并且从生理学和心理学的角度证明了其边缘检测的有效性。在 LOG 算子中,具有完美数学特性的高斯函数能有效消除一切尺度远小于高斯滤波器方差的图像灰度变化。用不同尺度的 LOG 算子作用于图像,可得到图像在不同分辨率