

农业物联网与传感仪器研究进展*

何 勇 聂鹏程 刘 飞

(浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058)

摘要: 农业物联网系统包括感知、传输和应用3个层次。传感仪器是感知层的核心,包括利用传感、遥感等先进技术手段获取作物、土壤、环境等农业多维信息;传输层包括 Zigbee、GPRS、WIFI、蓝牙等无线传输方式和网络技术结合形成无线传输网络;应用层包括多维信息融合、智能决策、自动控制等农业智能化管理。对农业物联网的3个层次分别展开了系统分析,提出了农业物联网研究方向,展望了农业物联网系统在现代农业中的发展趋势。

关键词: 农业物联网 传感仪器 光谱 检测 控制

中图分类号: TP393.18;F304;S127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)10-0216-11

Advancement and Trend of Internet of Things in Agriculture and Sensing Instrument

He Yong Nie Pengcheng Liu Fei

(College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The internet of things (IOT) in agriculture consisted three layers, including perceive, transportation and application. The perceive layer were used to acquire the information of crops, soil and environment. The transportation layer was used to establish the transportation network of IOT in agricultural by combing the techniques like GPRS, Zigbee, WIFI, Bluetooth and the intelligent networking methods. The process layer focused on the intelligent management of agriculture, including multidimensional information fusion, intelligent decision and automatic control, et al. The key problems, research emphasis and application fields of IOT in agriculture include three layers were discussed in detail and analyzed. The prospect and development trend of IOT in agricultural in modern agriculture was put forward.

Key words: Internet of things in agricultural Sensing instrument Spectrum Gauging Control

引言

农业要实现高产、优质、安全地可持续发展,必须借助科学的手段,充分利用信息化与智能化管理技术建立起农业生产、加工、流通的规范化管理体系。我国农业正处于传统农业向现代化农业的转型时期,全面实践这一新技术体系的变革,农业物联网与传感仪器将会发挥独特而重要的作用,也为现代化农业发展提供了前所未有的机遇。

物联网技术作为21世纪的新兴技术,得到世界

各国的高度重视。物联网主要包括3个层次:感知层、传输层与应用层。农业传感仪器是物联网中的感知层,是人类了解作物需求的眼睛;农业物联网传输层是农业信息传递的介质,也是农业信息实时动态获取的技术保障;物联网应用层是实现对农作物安全生产、加工、流通的监控与智能化管理的手段。农业物联网3个层次的研究与发展将会影响现代农业的发展进程,将会对整个农业生产体系的变革产生巨大的作用。

本文主要对农业物联网的3个层次和农业传感

收稿日期: 2013-08-12 修回日期: 2013-08-20

* 国家自然科学基金重点资助项目(31071332)和国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011AA100705)

作者简介: 何勇,教授,博士生导师,主要从事数字农业与农业物联网研究, E-mail: yhe@zju.edu.cn

仪器与感知方法进行分析,提出每个层次的发展研究方向,展望农业物联网的发展前景与趋势。

1 农业物联网感知层

感知层是农业物联网获取农业生产信息的关键手段,也是目前农业物联网发展技术瓶颈之一。先进的传感仪器将是推动农业物联网发展的关键因素,农业物联网区别于其他物联网在于感知层所感知的对象不同。农业物联网主要面向农业生产、加工、流通领域。目前,在植物与土壤信息感知方面,传感器的稀缺是制约土壤与植物信息感知的最主要因素。研制新型低功耗植物信息与土壤养分信息传感器是目前农业物联网技术发展急需解决的问题。何勇等在植物养分、生理与土壤信息检测方面研制了相关传感仪器^[1~2],如图 1、2 所示。

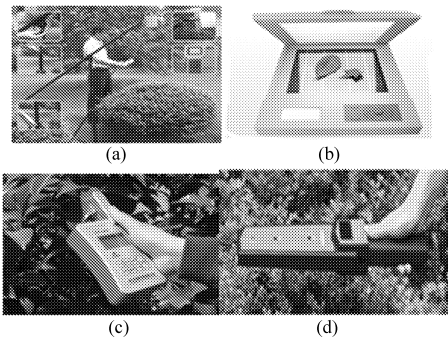


图 1 植物生理生态信息感知仪器

Fig. 1 Instrument of plant physiological information sensing

(a) 植物冠层信息光谱仪 (b) 植物叶面积仪
(c) 植物养分检测仪 (d) 植物二波段冠层仪



图 2 土壤养分信息感知仪器

Fig. 2 Soil nutrient information sensing instrument

植物、土壤、环境信息的感知技术不仅包括理化性质检测,也包括利用光谱、多光谱、高光谱、核磁共振等先进检测方法^[3]。

1.1 光谱技术在农业信息感知中的应用

1.1.1 植物养分信息检测技术

国内外对植物生长信息中的植物养分诊断的研究和应用起始于 19 世纪。目前国内外植物营养诊断的手段有外观诊断、化学诊断、叶绿素计氮营养诊断和光谱诊断等。氮素是影响作物生长与产量的主要因素之一。由于叶片含氮量和叶绿素含量之间的

变化趋势相似,所以可以通过测定叶绿素含量来监测植株氮素营养^[4]。Liu 等研究了利用光谱技术检测油菜叶片养分含量,获得了较好的效果^[5]。何勇等采用可见/近红外光谱技术进行了油菜、黄瓜等叶片 SPAD 值的无损检测^[6]。对于作物氮素含量的无损检测研究,主要采用机器视觉技术、光谱分析技术以及多光谱与高光谱成像技术。Ahmad 等评估了缺水 and 缺氮造成的植株颜色变化^[7]。Inoue 等采用波长 400~900 nm 范围的可见/近红外光谱建立了多元回归模型,对水稻叶片的氮含量和叶绿素含量进行了预测,决定系数 R^2 分别达到了 0.72 和 0.86^[8]。Cui 等研究了作物叶片氮含量与光谱的定量检测模型^[9]。Shao 等研究了水稻叶片氮积累量与反射光谱的定量关系^[10]。杨海清等应用可见/近红外光谱技术进行了油菜叶片 SPAD 值的无损检测^[11]。在光谱成像技术应用方面,Noh 等建立了多光谱图像和作物氮素胁迫的关系模型^[12]。冯雷等用 3CCD 多光谱成像技术建立了油菜植被指数和叶绿素仪测量值的定量关系^[13]。杨玮等采用 CCD 照相机加滤光片获取多光谱图像进行了黄瓜叶片等的氮含量检测^[14]。刘飞等应用光谱和机器视觉技术等快速检测方法获得了黄瓜叶片的氮含量和叶面积指数^[15]、油菜冠层特征参数^[16]。Zhang 等应用高光谱成像技术建立了油菜叶片养分预测和可视化分布图,获得了满意的预测结果^[17]。

1.1.2 植物生理生态信息动态监测技术

国内外应用光谱技术、多光谱成像技术、高光谱成像技术等进行植物生理信息检测的研究才刚刚起步,浙江大学率先在此领域进行了大量的探索工作,取得了一定的成果。在植物生理信息中氨基酸类物质的检测研究方面,刘飞等应用近红外光谱技术结合连续投影算法(SPA)实现了油菜在正常生长和除草剂胁迫下叶片氨基酸总量(TAA)、脯氨酸、的快速无损检测^[18~19]。孙光明等应用近红外光谱技术实现除草剂胁迫下油菜叶片中脯氨酸含量的快速检测^[20]。刘飞等应用可见/近红外光谱技术实现了油菜叶片中乙酰乳酸合成酶(ALS)、可溶性蛋白、非可溶性蛋白、总蛋白的快速无损检测^[21~23]。Bao 等应用可见/近红外光谱实现了除草剂胁迫下大麦叶片总氨基酸含量的快速检测^[24]。Bao 等应用近红外光谱技术实现了除草剂胁迫下油菜谷氨酸含量的快速检测^[25]。Kong 等应用可见/近红外光谱技术结合高斯回归等方法实现了大麦叶片超氧化物歧化酶的快速检测^[26]。在植物生态信息检测研究方面,刘伟东等建立了光谱发射率与一阶微分反射率和叶面积指数(Leaf area index, LAI)之间的相关关系^[27]。

Patel 等利用植被反射光谱的红边参数反演叶面积指数^[28]。

1.1.3 植物病害及农药等非生物胁迫信息检测技术

早期发现并确定作物病害的发生,可以提高施药决策防治的针对性和准确性,从而做到对症下药,按需施药,并有效降低均匀施药带来的环境污染和药品浪费。传统的作物病害信息获取方法通常是借助显微工具或者肉眼直接判别病害的种类和程度,存在主观性强、工作量大、覆盖范围窄、效率低、成本高等缺点,不适用于精准农业对作物病害信息快速获取的需要。作物当受到病害侵染后,外观形态和生理效应均会发生一定的变化,与健康作物相比,某些光谱特征波段值会发生不同程度的变异,使得采用图像处理技术、光谱分析技术,以及多光谱和高光谱成像技术等进行作物病害快速检测成为可能。在植物病害信息快速检测技术研究方面,Adams 等利用大豆黄萎病光谱二阶导数设计的发黄指数对病情评价进行了研究^[29]。刘飞等研究了水稻冠层光谱的叶瘟诊断研究^[30]。冯雷等利用多光谱成像技术对水稻叶瘟进行了早期的分级检测^[31]。孙光明等采用多光谱成像技术进行了大麦赤霉病的无损检测^[32]。Chaerle 等用热成像技术对植物病害进行早期诊断和预测^[33]。刘飞等应用可见/近红外光谱技术实现了油菜叶片菌核病的快速无损诊断^[34]。谢传奇等应用高光谱成像技术实现了灰霉病胁迫下番茄叶片 SPAD 值^[35]和茄子灰霉病叶片过氧化氢酶活性快速检测^[36]。后续应综合应用上述技术,研究开发植物病害远程可视化诊断监控技术和设备,实现植物病害早期诊断和预警预报。

1.1.4 植物虫害信息检测技术

传统的作物虫害检测方法工作量大,检测范围小,时效性差,检测成本高。由于虫害存在活动性强和易被遮蔽等特点,因此,要准确检测每只害虫既不可能,也没必要。目前主要的虫害信息快速获取方法包括声音特性检测、雷达观测、光谱分析以及图像识别等^[37]。Watson 等^[38]开发了数字图像自动识别系统,识别的正确率达到 83%。Leckie 等利用松树冠层光谱图像,对松树蚜虫的侵害程度进行检测分析^[39]。Zhao 等应用高光谱成像技术实现了水稻稻飞虱侵害程度的判别^[40]。Han 等应用 DSP 和 3G 无线通信技术建立了虫害远程诊断识别系统^[41]。

由于作物虫害检测中各个方法均存在优缺点,未来虫害检测需要朝着多种技术相结合的组合方式进行,多角度获得虫害信息,并进行相互验证,并将检测的实时性和田间光谱采集环境的多变性考虑进去,提高虫害识别的效率和精度。研究开发植物虫

害远程可视化诊断监控技术和设备对及早发现和防治虫害的发生和发展尤为重要。

1.2 核磁共振成像技术在农业信息感知中的应用

核磁共振成像(Magnetic resonance imaging, MRI)是一种先进的非接触式无损检测方法,在作物根系形态获取和农产品品质检测方面已有探索应用。在作物根系形态测量方面,传统的根系研究方法包括挖掘法、土钻法、根室法、微根管法和同位素法等^[42]。上述研究方法大都属于破坏性方法,对作物的生长发育有一定的影响,且在实施根系测量过程中易于产生误差,获取的根系信息有限,而采用无土栽培方法存在与实际生长环境下根系形态发育不等效等瓶颈问题。随着 X 射线计算机层析成像(XCT)和核磁共振成像(MRI)等先进技术的发展,为实现作物根系的原位无损检测提供了有效的手段和方法。Heeraman 等利用 XCT 技术对生长在 PVC 容器中 14D 大小的豆科作物实现了根系的原位定量研究^[43]。Kaestner 等利用 4 个月大生长在天然冰碛土的桤木根 XCT 数据对根系网络进行了重建^[44]。Macfall 等利用 MRI 获得了大豆根系较为清晰的三维图像^[45]。Kaufmann 等应用核磁共振成像研究了玉米根系在干旱胁迫下的响应特性^[46]。罗锡文等利用多层螺旋 XCT 设备对植物根系进行了原位可视化的研究^[47-49]。朱同林等应用多角度二维图像合成了大豆根系三维结构^[50]。张建锋等应用核磁共振成像(MRI)技术实现了玉米、大豆和茄子 3 种作物根系的三维构型,为作物三维构型定量描述和原位检测提供了一种新的途径^[51]。

在农产品品质检测方面,张建锋等研究了芒果、香蕉和苹果的核磁共振断层切片图像,借助于计算机图形学技术和视觉化工具函数库 Visualization Toolkit 5.4(VTK),实现了其几何模型的重构,结果表明所建几何模型的体积值与其真实值之间的误差均小于 3%,与标准方法测得结果具有很好的一致性^[52]。Taglienti 等利用核磁共振成像技术研究了猕猴桃生理变化与水分迁移对果实内部细微结构变化的影响^[53]。Zhou 等通过人工神经网络模型对黄花梨赤道处的 MRI 切片图像进行分析,实现了黄花梨坚实度的预测^[54]。周水琴等应用 MRI 图像结合形态学方法实现了香梨内部褐变的诊断识别^[55]。

2 农业物联网传输层

农业物联网网络传输层是农业信息实时动态获取的关键技术之一。农业物联网信息无线传输与工业差别较大,农作物生长环境复杂,不仅气候对无线通信有影响,而且随着作物生长状况的不断变化也

容易对无线传输产生严重的影响。农业信息获取在时效性上要求不高。传输过程中的稍许延时对农业生产影响不大。因此,复杂的农业环境对物联网通信网络有着特殊的要求。

2.1 农业物联网特殊性

农业物联网所处物理环境及网络自身状况与工业物联网有本质区别。农业物联网的主要特点有:

(1) 传感节点布置稀疏、不规则

农业物联网传感节点的布置,既要考虑低成本,又要考虑可靠的传输性能。在大规模农田或设施中,可以根据实际情况划分成若干个小区域,每个小区里可以近似地认为环境相同、土质、土壤养分含量基本相同。因此,在实际应用中往往把信息采集设备稀疏地布置在监控区域内,节点与节点间的距离较远。农田由于道路、河流等影响,传感节点的布置往往也是不规则的。

(2) 传输距离远、功耗低

农业物联网信息采集节点与节点之间的距离往往会比较远,采集设备一般使用太阳能供电,且无人维护。因此,节点不仅要求传输距离远,还要求功耗小,在有限的太阳能供电情况下实现长期不断电工作。

(3) 工作环境恶劣

农业生产环境复杂、恶劣,在高温、高湿、低温、雨水等复杂多变环境下连续不间断运行的。农业物联网设备要求具有应对恶劣环境的能力。同时,目前农业从业人员往往文化水平不高,缺乏设备维护能力,因此,要求农业物联网设备必须稳定可靠,而且要具有少维护、免维护、自诊断的能力。

(4) 通信容易受植被影响

农业物联网无线通信不仅容易受到环境干扰,也容易受到植被的影响。随着作物生长状况的变化,容易形成对农业物联网无线传输的电磁波产生遮挡或干扰,对农业无线传输产生一定的影响。

综上所述,农业物联网技术应用特点及环境与工业物联网有明显区别。工业组网规则不能很好满足农业物联网组网及应用要求。因此,需要专门针对农业大规模物联网信息采集的信息节点研究低功耗、低成本的智能化自组网通信协议。

2.2 常用的农业物联网无线传输方法

随着互联网技术、无线传感技术、信息处理技术的快速发展,物联网技术受到越来越多的重视。农业物联网的发展改变了农业的管理模式,其中农业物联网组网通信技术成为研究的重点。农业物联网通信技术主要包括 Zigbee 技术、WIFI 网络、GPRS、蓝牙技术等传输方式。

2.2.1 Zigbee 技术

Zigbee 技术具有功耗低、数据传输可靠、网络容量大、兼容性好、安全性好、实现成本低等特点,在工业控制、家庭自动化、农业自动化等领域都有广泛应用。Zigbee 技术在短距离、低传输速率传输方式的农业物联网手持式仪器、无线传感器网络信息采集节点等信息的传输方面得到了应用。Yang 等通过 Zigbee 无线传感器网络节点采集在智能温室温室的湿度和温度,然后通过模糊控制分析智能温室空调设备通风口的温度和湿度,从而采取最优的控制模型^[56],如图 3 所示。Xu 等分析了中国农业和 Zigbee 无线传感器网络的发展,对温室大棚的智能灌溉系统进行了研究,智能灌溉系统收发器硬件的设计采用基于 Zigbee 无线传感其网络和 CC2530 内核,并在河海大学对水仙花进行智能灌溉实验,证明了基于 Zigbee 无线传感技术的智能灌溉系统在提高农业灌溉水平上具有重要意义^[57]。

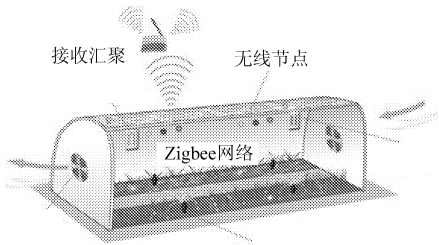


图 3 Zigbee 网络在农业中的应用

Fig. 3 Application of Zigbee network in agriculture

2.2.2 WIFI 技术

WIFI 物联网系统充分利用现有普及的 WIFI 网络资源,有效地提高了无线网络的通信距离和覆盖面积,具有成本低、普及性好、兼容性强、传输带宽宽、传输速度快、标准化等优点,使得 WIFI 物联网在国内外被广泛应用在智能工业、智能家居、精细农业等领域,在农业上的基本应用如图 4 所示。

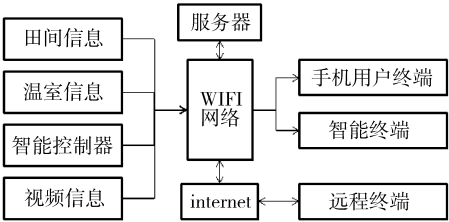


图 4 WIFI 网络在农业中的应用

Fig. 4 Application of WIFI network in agriculture

Wang 等将传感器网络应用于深海环境监测平台中,WIFI 无线技术在 SOPC 的高速可编程上有了新的突破,这一技术在农业的智能生产中也开展了应用^[58];Qi 等研究利用 WIFI 的无线传感器网络 (WSN) 与 Zigbee 网络结合在农业生产的信息获取上开展了应用^[59];Otoniel 等提出了一种自动监测系

统基于一个低成本的 WIFI 技术的图像传感器,周期性的捕捉和发送农田作物的病虫害信息到远程控制站^[60]。

2.2.3 GPRS 通信技术

GPRS 是一种分组数据承载业务,具有实时在线、按量计费、快捷登录、高速传输、自如切换等优点,广泛应用在手持式仪器设备、农业物联网等领域,GPRS 无距离限制,但需要通信费用。Antonio 等提出了一个基于无线传感器网络技术的农田信息的数据采集系统,该作物的检测系统由 GPRS 网络与集成检测电路构成,通过传感器和 GPRS 通信模块实现数据采集和传输,满足了作物信息实时获取的要求^[61]。GPRS 在农业上的应用如图 5 所示。

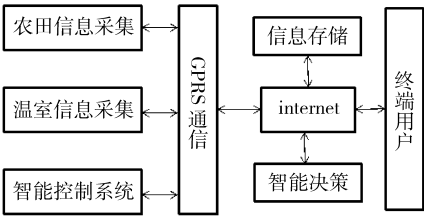


图 5 GPRS 网络在农业中的应用

Fig. 5 Application of GPRS network in agriculture

2.2.4 蓝牙通信技术

蓝牙是一种短距离无线通讯技术,带蓝牙功能的设备之间可以透过蓝牙而连接起来,传输速度可以达到 1 MB/s,而且不容易受到外界干扰源的影响,使用的频谱在各国都不受限制。因此,蓝牙在农业物联网系统中的应用潜力较大,蓝牙通信在农业上的基本应用模式如图 6 所示。蓝牙技术在食品、农业、化工和制造业中都有应用^[62],Reaves 等设计了对 8 个独立喷嘴快速控制器,在不同的季节都能够准确操作定位,并采用蓝牙技术完成控制器与传感器设备之间的无线数据传输,以及设备之间的控制^[63]。

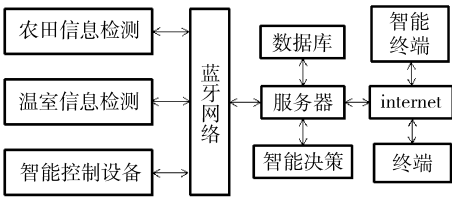


图 6 蓝牙技术在农业中的应用

Fig. 6 Application of Bluetooth technology in agriculture

2.2.5 常用无线通信技术的比较

上述 4 种作为物联网常用的通信方式各有特点,在不同的应用场景下可以发挥各自优势,扬长避短,也可以将这 4 种通信方式进行组合,达到高效、远程传输的目的。4 种通信方式的各自性能比较如表 1 所示。

表 1 4 种常用网络性能对比

Tab.1 Comparison of four kinds of commonly used network performance

网络性能	Zigbee	GPRS	WIFI	蓝牙
传输距离	短	远	较远	短
功耗	低	一般	低	低
成本	低	高	低	低

从发展角度而言,WIFI 网络因具有带宽较宽、传输速度快、兼容能力强、抗干扰能力强等优势,将会发展成农业物联网系统传输层的重要媒介,也将是农业物联网传输层的重要研究方向。

在农业生产应用上,随着作物的生长不断变化容易对无线信号遮挡与干扰,而且农业物联网布点密度稀,很容易使原通信网络中的某个节点从网络中孤立出来,而这个节点又担负着很多设备的通信路由任务,一旦发生某个节点的损坏后被网络孤立,极易导致网络的局部甚至大部分瘫痪。因此,针对农业生产实际环境特殊性,解决以上问题将是农业物联网传输层的重要研究方向。

2.3 主动诱导式自组织农业物联网

为解决农业物联网节点损坏或因植物生长、环境变化导致有效通信距离变短而被网络孤立,最后导致网络的局部瘫痪甚至大面积瘫痪,聂鹏程研究了一种主动诱导式组网方法^[64]。

主动诱导式自组织农业物联网协议的组网原理是:利用上位机诱导网络遍历、最小路径组网、深度路由预防算法、深度路由处理机制和消息机制等方法实现农业物联网的组网通信方式。提升了深度路由能力和网络传输效率和网络性能,经过测试该网络性能如图 7 所示。

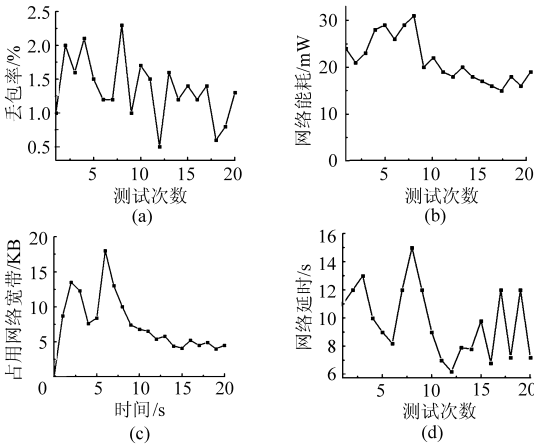


图 7 自组织农业物联网网络性能

Fig. 7 Performance self-organization of agricultural network

主动诱导式组网设备也与一般 Zigbee 设备结构不同,设计了一个可编程的无线信号放大器。当

无线信号受环境影响而使有效通信距离变短而被网络孤立后,通过程控放大器增大发射功率,直到重新联入网络。其硬件结构如图 8 所示。

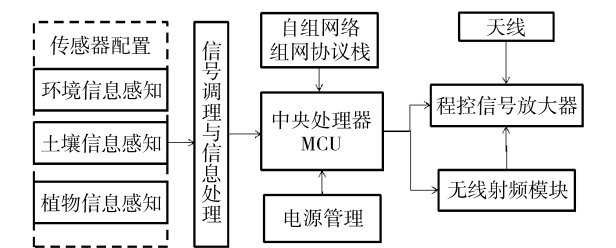


图 8 物联网信息采集设备硬件结构

Fig. 8 Hardware structure of information collection system of internet of things

为兼顾农田物联网设备的成本,大规模农田信息采集中的物联网节点在有效通信范围内很难找到多个信息点可建立通信转发的机制。因此,针对这种情况提出通过软件控制发射器功率来增大通信有效半径的方式,达到与其他节点建立联系的目的,并最终进入自组织网络,传输数据,其原理如图 9 所示。

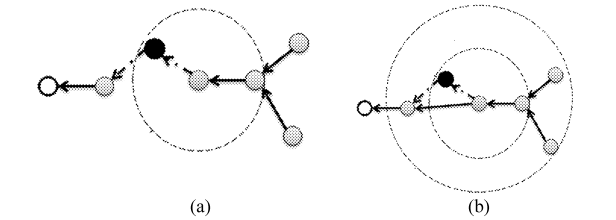


图 9 程控发射信号功率的路由维护原理图

Fig. 9 Routing maintaining schematic diagram of program-controlled emission signal power

(a) 节点失效时网络中断 (b) 后向节点增大功率后网络联通

3 农业物联网应用层

农业物联网系统应用层是实现农业信息化与智能化的关键,目前,农业物联网主要在农业生产过程中的种植业、水产养殖与畜牧业、农产品加工、运输与流通领域中的进行广泛应用。

3.1 农业物联网在种植业上的应用

3.1.1 大田种植中的应用

在大田种植业中,农业物联网系统主要实施对田间作物信息、土壤信息、环境信息的不间断监测,以土壤水分信息作为自动灌溉的参数实现大田中的自动灌溉或灌溉提示,将植物与环境信息作为作物病虫害预警预报信息。其基本物联网应用模式如图 10 所示。

吴才聪等研究了移动管理的住处获取技术,通过在田间设置无线传感器获取田间信息和定位位置,并通过 Zigbee 技术将信息传输到 PDA,将 PDA

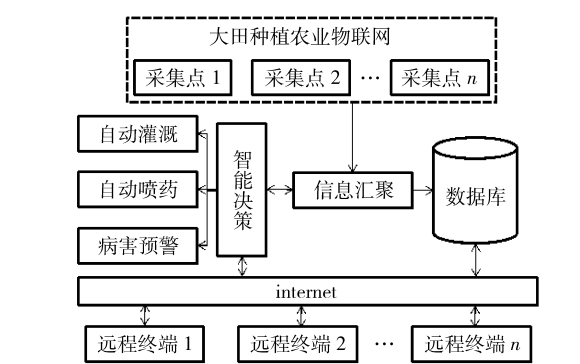


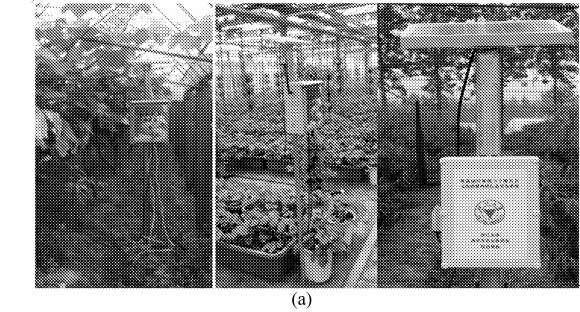
图 10 大田种植业的农业物联网应用模式

Fig. 10 Application mode of agricultural IOT in field planting industry

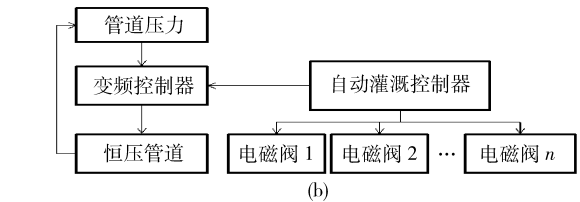
拍摄的图像等信息通过 GSM/GPRS 传输给远程服务器实现茶园 GIS 信息远程管理^[65]。夏于等利用农业物联网技术监测小麦生长环境,诊断小麦苗情,融合小麦生理生态特性和作物气象灾害指标分析,实现了小麦生产过程和主要气象灾害的精准监测、快速诊断^[66]。杨信廷等研究了利用 Zigbee 网络实现了作物环境与长势远程监测^[67]。

3.1.2 果蔬种植业中的应用

何勇等利用农业物联网系统实现对果树、蔬菜园区的环境信息、土壤信息、和植物信息进行实时动态监测,通过获取的环境温湿度、光照、土壤水分等信息后,通过智能决策系统实现果蔬种植的智能化肥水变频管理,如图 11 所示。



(a)



(b)

图 11 果蔬生产中的物联网统应用

Fig. 11 Application of IOT in fruit and vegetable production
(a) 物联网信息采集设备 (b) 自动化灌溉系统构成

3.2 设施农业中的应用

农业物联网系统在设施农业中的应用国内外研究很多。在设施农业中,物联网技术将会发挥越来越重要的作用。设施农业可以将信息与智能化系统全面结合,实现农作物生长环境的最优控制和肥水

按植物需求智能化管理分配。何勇等在 73021 部队农场实施的设施农业物联网应用系统,如图 12 所示。

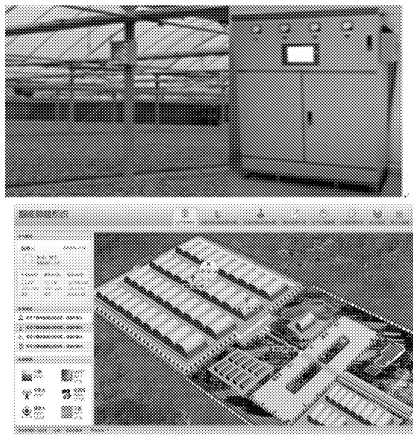


图 12 物联网在设施农业中的应用

Fig. 12 Application of IOT in facility agriculture

物联网采集设备实时获取温室内的空气温湿度、光照、土壤温、湿度,作物叶绿素、氮素含量等信息,通过无线传输到控制中心后,通过智能化决策控制系统实现温室内的天窗、遮阳、通风、湿帘、卷膜与卷帘等自动智能控制以及温室内自动肥水管理,智能喷药等控制。为温室内作物提供最佳的生长环境,对作物产量和产品品质有明显提升。

3.3 水产养殖与畜牧中应用

在水产养殖行业,农业物联网也充分发挥了实时信息监测与在线监控的优势。水产行业的农业物联网系统主要实时获取养殖水体的各项重要参数,如溶解氧、pH 值、氨氮、亚硝酸盐等含量,通过实时获取的数据来实现养殖水体增氧、换水或其它消毒、排污等自动化控制。大大降低了水产养殖风险,其应用如图 13 所示。

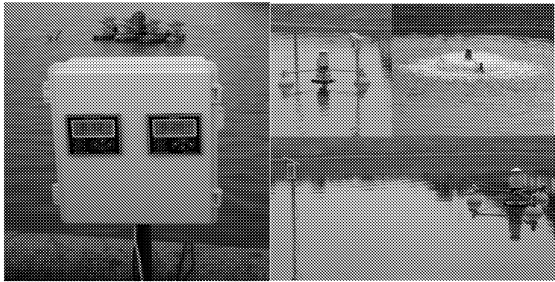


图 13 物联网在水产养殖中的应用

Fig. 13 Application of IOT in aquaculture

在畜禽业方面,国内外也开展了大量的物联网系统应用研究。如大量使用 RFID 与电子标签技术实现对动物群体的个体进行识别与跟踪,使用物联网技术对畜牧、畜禽养殖舍内的环境实时检测与自动化调控,在畜牧、畜禽的生活习惯、行为动态监测与福利养殖中发挥了重大作用^[68]。

3.4 农产品加工、流通中的应用

近年来我国食品安全频频暴出重大安全问题,其原因主要是缺少科学管理与质量监控体系,农业物联网技术的发展将在食品安全加工领域发挥重大的作用。白红武等研究了 QR 二维码技术与物联网技术、安全溯源技术,开发了农产品质量安全溯源系统。形成一个具有三方满意和消费者评级功能的便民服务平台^[69]。Marra 等应用了物联网技术获取罐头内部的传热数据,获得了罐装食品在热杀菌中的热传导模型^[70]。农产品加工区利用物联网技术实现对加工车间的环境监测和智能化管理。应用物联网技术构建食品加工监控系统,对中心区的环境、设备的卫生状况进行严格的监控,建立安全实时可靠的农产品加工监控系统与警报系统。另外,在农产品运输过程中,利用农业物联网设备进行跟踪与监控,实现物流车辆内环境信息实时监控,建立农产品电子标签识别体系,构成一个集电子标签识别技术与安全溯源技术及加工环节物联网监控技术于一体的农产品加工、流通智能化管理体系,实现农产品生产、流通的严厉监管,保障食品安全。

4 农业物联网的发展趋势展望

农业物联网技术将深入农业生产全过程,并在农业生产管理中发挥巨大作用,具体将会在以下几方面具有较好的应用前景。

4.1 农业传感器研究的新机遇

农业传感器技术作为农业信息感知的“眼睛”在农业物联网信息感知系统中扮演着至关重要的角色。新型农业传感器的开发将是农业物联网产业中必不可少的重要环节。随着科技的发展,将越来越多地关注成本低、性能好、能耗低、技术先进的农业作物与土壤信息检测传感器。MEMS 农业传感器也将成为重要研究领域之一,一批新型的农业 IT 企业将会形成规模。

4.2 高附加值农产品生产精细化

随着农业物联网技术在现代农业发展中的深入,对附加值高的农产品精细化管理将是农业物联网发展与应用的潜力所在。利用物联网技术对高附加值农作物实现精准化播种、育秧、生产环境控制、精准定量施肥及精量施药等控制具有重大意义,是提升高附加值农产品品质和产量、节省人工的重要手段,是未来高附加值农产品标准化与智能化生产的关键技术依托。

4.3 农业物联网与现代农机结合发展

目前,农业装备在满足不同层次需求的同时,逐步向大型化、精准化、智能化方向发展,农业装备作

为农业作业过程中的执行机构,将发展为物联网后端的智能执行系统,在农业生产过程中发挥重要作用,如实现农业物联网的智能化变量施肥、智能病虫害防治等。同时,现代农业机械化作业过程也越来越依赖于农作物信息的感知、农业数据的传递、系统的优化与农业生产智能决策,而农业物联网技术恰恰在这几方面能发挥独特而又重要的作用。因此,农业机械化与物联网技术的结合发展也将成为物联网发展的一个重要研究方向。

4.4 农业物联网在农产品和食品安全中发挥更大的作用

农业物联网作为一种从农业生产、农产品加工、流通到消费全程可监控的技术手段,将越来越在食品安全领域发挥重要作用。农业物联网感知的信息可以作为农产品生产过程全程追溯的重要信息,农产品在流通与销售环节通过二维码、电子标签等技术获取准确产地,消费者既能通过全程追溯到该农产品的产地、流通环节的各项信息,也能通过追溯系统与物联网系统的结合查询到生产中的肥料、农药用量信息,并将农产品物流全程信息进行记录与跟

踪,通过食品安全追溯系统通过与农业物联网系统的结合将更加有力保障消费者的权益,保障食品安全。

5 结束语

农业物联网的使命是降低农业生产成本、降低农业从业人员劳动强度、改善农业从业环境、提升农产品产量和品质、保障农产品与食品安全。农业物联网的发展将会在上述各个环节中发挥更加显著的作用。

农业物联网系统属于复杂大系统,涵盖了农业信息获取与传感仪器技术、数据传输与网络通信技术、数据融合与智能决策、专家系统、自动化控制技术等,是一种物与物、物与人的交流互动平台,也是一种开放式平台。随着科技的不断发展,将会有越来越多的先进科技融入农业物联网中,推动农业物联网发展。同时,农业物联网发展的也将推动其他行业的同步发展,农业物联网的发展将可能成为推动现代化与可持续性农业发展的基础和动力。

参 考 文 献

- 1 聂鹏程,杨燕,刘飞,等. 植物叶面积无损测量方法及仪器[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 198 ~ 201.
Nie Pengcheng, Yang Yan, Liu Fei, et al. Method of non-destructive measurement for plant leaf area and its instrument development [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(9): 198 ~ 201. (in Chinese)
- 2 聂鹏程,袁石林,章伟聪,等. 基于光谱技术的水稻叶片氮素测定仪的开发[J],农业工程学报,2010,26(7):152 ~ 156.
Nie Pengcheng, Yuan Shilin, Zhang Weicong, et al. Development of fast-determination instrument for rice leaf nitrogen content based on spectroscopy [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(7): 152 ~ 156. (in Chinese)
- 3 何勇,赵春江,吴迪,等. 作物-环境信息的快速获取技术与传感仪器[J]. 中国科学, 2010, 40(增刊1):1 ~ 20.
He Yong, Zhao Chunjiang, Wu Di, et al. Fast detection technique and sensor instruments for crop-environment information: a review[J]. Science China Press, 2010, 40(Supp. 1): 1 ~ 20. (in Chinese)
- 4 Bullock D G, Anderson D S. Evaluation of the Minolta SPAD-502 chlorophyll meter for nitrogen management in corn[J]. Journal of Plant Nutrition, 1998, 21(4): 741 ~ 755.
- 5 Liu Fei, Nie Pengcheng, Huang Min, et al. Nondestructive determination of nutritional information in oilseed rape leaves using visible/near infrared spectroscopy and multivariate calibrations[J]. Science China Information Sciences, 2011, 54(3): 598 ~ 608.
- 6 刘飞,王莉,何勇,等. 基于可见/近红外光谱技术的黄瓜叶片 SPAD 值检测[J]. 红外与毫米波学报, 2009, 28(4): 272 ~ 276.
Liu Fei, Wang Li, He Yong, et al. Detection of SPAD value of cucumber leaves based on visible/near infrared[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2009, 28(4): 272 ~ 276. (in Chinese)
- 7 Ahmad I S, Reid J F. Evaluation of colour representations for maize images [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1996, 63(3): 185 ~ 195.
- 8 Inoue Y, Penuelas J. An AOTE-based hyperspectral imaging system for field use in ecophysiological and agricultural applications [J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22 (18): 3 883 ~ 3 888.
- 9 Cui D, Li M Z, Zhang Q. Development of an optical sensor for crop leaf chlorophyll content detection[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 69(2): 171 ~ 176.
- 10 Shao Y N, Zhao C J, Bao Y D, et al. Quantification of nitrogen status in rice by least squares support vector machines and reflectance spectroscopy [J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 5(1): 100 ~ 107.
- 11 杨海清,姚建松,何勇. 基于反射光谱技术的植物叶片 SPAD 值预测建模方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(6): 1 607 ~ 1 610.

- Yang Haiqing, Yao Jiansong, He Yong. SPAD prediction of leave based on reflection spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(6): 1 607 ~ 1 610. (in Chinese)
- 12 Noh H, Zhang Q, Han S, et al. Dynamic calibration and image segmentation methods for multispectral imaging crop nitrogen deficiency sensors [J]. Transactions of the ASAE, 2005, 48(1): 393 ~ 401.
- 13 冯雷, 方慧, 周伟军, 等. 基于多光谱视觉传感技术的油菜氮含量诊断方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(9): 1 749 ~ 1 752 .
- Feng Lei, Fang Hui, Zhou Weijun, et al. Nitrogen stress measurement of canola based on multi-spectral charged coupled device imaging sensor [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2006, 26(9): 1 749 ~ 1 752. (in Chinese)
- 14 杨玮, Nick Sigrimis, 李民赞. 基于多光谱图像分析的温室黄瓜叶片营养元素检测与诊断[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(1): 210 ~ 213.
- Yang Wei, Nick Sigrimis, Li Minzan. Nitrogen content testing and diagnosing of cucumber leaves based on multispectral imagines [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(1): 210 ~ 213. (in Chinese)
- 15 刘飞, 王莉, 何勇. 应用多光谱图像技术获取黄瓜叶片含氮量及叶面积指数[J]. 光学学报, 2009, 29(6): 1 616 ~ 1 620.
- Liu Fei, Wang Li, He Yong. Application of multi-spectral imaging technique for acquisition of cucumber growing information[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(6): 1 616 ~ 1 620. (in Chinese)
- 16 Liu F, Kong W W, He Y. Nondestructive estimation of nitrogen status and vegetation index of oilseed rape canopy using multi-spectral imaging technology [J]. Sensor Letters, 2011, 9(3): 1 126 ~ 1 132.
- 17 Zhang Xiaolei, Liu Fei, He Yong, et al. Detecting macronutrients content and distribution in oilseed rape leaves based on hyperspectral imaging [J]. Biosystems Engineering, 2013, 115(1): 56 ~ 65.
- 18 刘飞, 张帆, 方慧, 等. 连续投影算法在油菜叶片氨基酸总量无损检测中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(11): 3 079 ~ 3 083.
- Liu Fei, Zhang Fan, Fang Hui. et al. Application of successive projections algorithm to nondestructive determination of total amino acids in oilseed rape leaves [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(11): 3 079 ~ 3 083. (in Chinese)
- 19 Liu F, Jin Z L, Naeem M S, et al. Applying near-infrared spectroscopy and chemometrics to determine total amino acids in herbicide-stressed oilseed rape leaves[J]. Food and Bioprocess Technology, 2011, 4(7): 1 314 ~ 1 321.
- 20 孙光明, 刘飞, 张帆, 等. 基于近红外光谱技术检测除草剂胁迫下油菜叶片中脯氨酸含量的方法[J]. 光学学报, 2010, 30(4): 1 192 ~ 1 196.
- Sun Guangming, Liu Fei, Zhang Fan, et al. Methods the proline content in oilseed rape leaves herbicide detection based on near infrared spectroscopy stress[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(4): 1 192 ~ 1 196. (in Chinese)
- 21 刘飞, 方慧, 张帆, 等. 应用光谱技术无损检测油菜叶片中乙酰乳酸合成酶[J]. 分析化学, 2009, 37(1): 67 ~ 71.
- Liu Fei, Fang Hui, Zhang Fan, et al. Nondestructive determination of acetolactate synthase in oilseed rape leaves using visible and near infrared spectroscopy [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2009, 37(1): 67 ~ 71. (in Chinese)
- 22 Liu F, Zhang F, Jin Z L, et al. Determination of acetolactate synthase activity and protein content of oilseed rape (*Brassica napus* L.) leaves using visible/near infrared spectroscopy[J]. Analytica Chimica Acta, 2008, 629(1 ~ 2): 56 ~ 65.
- 23 Liu Fei, Kong Wenwen, Tian Tian, et al. Estimation of acetolactate synthase activity in brassica napus under herbicide stress using near-infrared spectroscopy [J]. Transactions of the ASABE, 2012, 55(4): 1 631 ~ 1 638.
- 24 Bao Yidan, Kong Wenwen, He Yong, et al. Quantitative analysis of total amino acid in barley leaves under herbicide stress using spectroscopic technology and chemometrics [J]. Sensors, 2012, 12(10): 13 393 ~ 13 401.
- 25 Bao Yidan, Kong Wenwen, Liu Fei, et al. Detection of glutamic acid in oilseed rape leaves using near infrared spectroscopy and the least squares-support vector machine [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2012, 13(11): 14 106 ~ 14 114.
- 26 Kong Wenwen, Zhao Yun, He Yong, et al. Fast analysis of superoxide dismutase (SOD) activity in barley leaves using visible and near infrared spectroscopy [J]. Sensors, 2012, 12(8): 10 871 ~ 10 880.
- 27 刘伟东, 项月琴, 郑兰芬, 等. 高光谱数据与水稻叶面积指数及叶绿素密度的相关分析[J]. 遥感学报, 2000, 21(4): 279 ~ 283.
- Liu Weidong, Xiang Yueqin, Zheng Lanfeng, et al. Relationships betweenrice LAI, CH. D and hyperspectra data [J]. Journal of Remote Sensing, 2000, 21(4): 279 ~ 283. (in Chinese)
- 28 Patel N K, Patnaik C, Dutta S, et al. Study of crop growth parameters using airborne imaging spectrometer data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(12): 2 401 ~ 2 411.
- 29 Adams M L, Philpot W D, Norvell W A. Yellowness index: an application of spectral second derivatives to estimate chlorosis of leaves in stressed vegetation [J]. International Journal of Remote Sensing, 1999, 20(18): 3 663 ~ 3 675.
- 30 刘飞, 冯雷, 柴荣耀, 等. 基于直接正交信号校正的水稻冠层叶瘟光谱诊断[J]. 光学学报, 2010, 30(2): 585 ~ 589.
- Liu Fei, Feng Lei, Chai Rongyao, et al. Rice canopy direct orthogonal signal correction of spectral diagnosis based on leaf blast [J]. Journal of Optics, 2010, 30(2): 585 ~ 589. (in Chinese)
- 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): 2 730 ~ 2 733.
- Feng Lei, Chai Rongyao, Sun Guangming, et al. Identification and classification of rice leaf blast based on multispectral imaging

- sensor [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(10): 2 730 ~ 2 733. (in Chinese)
- 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.
- Sun Guangming, Yang Kaisheng, Zhang Chuanqing, et al. Identification of barley scab based on multi-spectral imaging technology[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(Supp.2): 204 ~ 207. (in Chinese)
- 33 Chaerle L. Presymptomatic visualization of plant-virus interactions by thermography [J]. *Nature Biotechnology*, 1999, 17(8): 813 ~ 816.
- 34 刘飞, 冯雷, 楼兵干, 等. 基于组合模拟波段的油菜菌核病早期诊断方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(7): 1 934 ~ 1 938.
- Liu Fei, Feng Lei, Lou Binggan, et al. Study on the early detection of sclerotinia of brassica napus based on combinational-stimulated bands [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(7): 1 934 ~ 1 938. (in Chinese)
- 35 谢传奇, 何勇, 李晓丽, 等. 基于高光谱技术的灰霉病胁迫下番茄叶片 SPAD 值检测方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(12): 3 324 ~ 3 328.
- Xie Chuanqi, He Yong, Li Xiaoli, et al. Study of detection of SPAD value in tomato leaves stressed by grey mold based on hyperspectral technique[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(12): 3 324 ~ 3 328. (in Chinese)
- 36 谢传奇, 冯雷, 冯斌, 等. 茄子灰霉病叶片过氧化氢酶活性与高光谱图像特征关联方法[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(18): 177 ~ 184.
- Xie Chuanqi, Feng Lei, Feng Bin, et al. Relevance of hyperspectral image feature to catalase activity in eggplant leaves with grey mold disease [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(18): 177 ~ 184. (in Chinese)
- 37 周志艳, 罗锡文, 张扬, 等. 农作物虫害的机器检测与监测技术研究进展[J]. *昆虫学报*, 2010, 53(1): 98 ~ 109.
- Zhou Zhiyan, Luo Xiwen, Zhang Yang, et al. Machine-based technologies for detecting and monitoring insect pests of crops: a review[J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2010, 53(1): 98 ~ 109. (in Chinese)
- 38 Watson A T, O'Neill M A, Kitching I J. Automated identification of live moths (Macrolepidoptera) using digital automated identification system (daisy) [J]. *Systematics and Biodiversity*, 2003, 1(3): 287 ~ 300.
- 39 Leckie D G, Cloney E, Joyce S P. Automated detection and mapping of crown discolouration caused by jack pine budworm with 2.5 m resolution multispectral imagery [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2005, 7(1): 61 ~ 77.
- 40 Zhao Yun, Xu Xing, Liu Fei, et al. A novel hyperspectral waveband selection algorithm for insect attack detection [J]. *Transactions of the ASABE*, 2012, 55(1): 281 ~ 291.
- 41 Han Ruizhen, He Yong, Liu Fei. Feasibility study on a portable field pest classification system design based on DSP and 3G wireless communication technology [J]. *Sensors*, 2012, 12(3): 3 118 ~ 3 130.
- 42 伯姆 W. 根系研究法[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- 43 Heeraman D A, Hopmans J W, Clausnitzer V. Three dimensional imaging of plant roots in situ with X-ray computed tomography [J]. *Plant and Soil*, 1997, 189(2): 167 ~ 179.
- 44 Kaestner A, Schneebeil M, Graf F. Visualizing three-dimensional root networks using computed tomography [J]. *Geoderma*, 2006, 136(1 ~ 2): 459 ~ 469.
- 45 Macfall J S. Visualization of root growth and development through magnetic resonance imaging [J]. *Current Topics in Plant Physiology: An American Society of Plant Physiologists Series*, 1998, 18: 67 ~ 77.
- 46 Kaufmann I, Schulze-Till T, Schneider H U, et al. Functional repair of embolized vessels in maize roots after temporal drought stress as demonstrated by magnetic resonance imaging [J]. *New Phytologist*, 2009, 184(2): 245 ~ 256.
- 47 罗锡文, 周学成, 严小龙, 等. 基于 XCT 技术的植物根系原位形态的可视化研究[J]. *农业机械学报*, 2004, 35(2): 104 ~ 106, 133.
- Luo Xiwen, Zhou Xuecheng, Yan Xiaolong, et al. Visualization of plant root morphology in situ based on X-ray CT imaging technology[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2004, 35(2): 104 ~ 106, 133. (in Chinese)
- 48 周学成, 罗锡文. 采用区域生长算法分割植物根系原位 CT 图像的改进算法[J]. *农业机械学报*, 2006, 37(12): 122 ~ 125.
- Zhou Xuecheng, Luo Xiwen. An improved region growing algorithm for the CT images segmentation of plant root[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2006, 37(12): 122 ~ 125. (in Chinese)
- 49 周学成, 罗锡文, 严小龙, 等. 基于遗传算法的原位根系 CT 图像的模糊阈值分割[J]. *中国图像图形学报*, 2009, 14(4): 681 ~ 687.
- Zhou Xuecheng, Luo Xiwen, Yan Xiaolong, et al. A fuzzy thresholding segmentation for plant root CT images based on genetic algorithm[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2009, 14(4): 681 ~ 687. (in Chinese)
- 50 朱同林, 方素琴, 李志垣, 等. 基于图像重建的根系三维构型定量分析及其在大豆磷吸收研究中的应用[J]. *科学通报*, 2006, 51(16): 1 885 ~ 1 893.
- Zhu T L, Fang S Q, Li Z Y, et al. Quantitative analysis of 3-dimensional root architecture based on image reconstruction and its application to research on phosphorus uptake in soybean [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(16): 1 885 ~ 1 893. (in

Chinese)

- 51 张建锋, 吴迪, 龚向阳, 等. 基于核磁共振成像技术的作物根系无损检测[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 181 ~ 185.
Zhang Jianfeng, Wu Di, Gong Xiangyang, et al. Non-destructive detection of plant roots based on magnetic resonance imaging technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(8): 181 ~ 185. (in Chinese)
- 52 张建锋, 何勇, 王南飞, 等. 基于核磁共振成像的农产品几何模型重构[J]. 农业工程学报, 2012, 28(21): 215 ~ 220.
Zhang Jianfeng, He Yong, Wang Nanfei, et al. Geometry modeling reconstruction of agricultural products by magnetic resonance imaging[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(21): 215 ~ 220. (in Chinese)
- 53 Taglienti A, Massantini R, Botondi R, et al. Postharvest structural changes of Hayward kiwifruit by means of magnetic resonance imaging spectroscopy [J]. Food Chemistry, 2009, 114(4): 1 583 ~ 1 589.
- 54 Zhou R, Li Y F. Texture analysis of MR image for predicting the firmness of Huanghua pears (*Pyrus pyrifolia* Nakai, cv. Huanghua) during storage using an artificial neural network [J]. Magnetic Resonance Imaging, 2007, 25(5): 727 ~ 732.
- 55 周水琴, 应义斌, 商德胜. 基于形态学的香梨褐变核磁共振成像无损检测[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2012, 46(12): 2 141 ~ 2 145.
Zhou Shuiqin, Ying Yibin, Shang Desheng. Morphology based noninvasive detection for fragrant pears browning with magnetic resonance imaging [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2012, 46(12): 2 141 ~ 2 145. (in Chinese)
- 56 Yang M T, Chen C C, Kuo Y L. Implementation of intelligent air conditioner for fine agriculture[J]. Energy and Buildings, 2013, 60: 364 ~ 371.
- 57 Xu Zongyu, Lou Baodong, Shao Guangcheng. An intelligent irrigation system for greenhouse jonquil based on ZigBee wireless sensor networks [J]. Internet of Things, 2012, 312: 200 ~ 207.
- 58 Wang Ning, Zhang Naiqian, Wang Maohua. Wireless sensors in agriculture and food industry—recent development and future perspective [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2006, 50(1): 1 ~ 14.
- 59 Qi Lin, Zhang Jian, Mark Xu, et al. Developing WSN-based traceability system for recirculation aquaculture[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2011, 53(11): 2 162 ~ 2 172.
- 60 Antonio J, Garcia S, Felipe G S, et al. Wireless sensor network deployment for integrating video-surveillance and data-monitoring in precision agriculture over distributed crops [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 75(2): 288 ~ 303.
- 61 Otoniel L, Miguel M R, Hector M, et al. Monitoring pest insect traps by means of low-power image sensor technologies [J]. Sensors, 2012, 12(11): 15 801 ~ 15 819.
- 62 Emanuel P, Miguel A F, Raul M, et al. An autonomous intelligent gateway infrastructure for in-field processing in precision viticulture [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 78(2): 176 ~ 187.
- 63 Song G L, Wang M H, Ying X, et al. The application of wireless sensor network in agriculture information collection [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 263(2): 872 ~ 877.
- 64 聂鹏程. 植物信息感知与自组织农业物联网系统[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- 65 吴才聪, 傅成, 苏怀洪, 等. 面向农业移动管理的信息获取技术[J]. 农业机械学报, 2009, 40(增刊): 169 ~ 172.
Wu Caicong, Fu Cheng, Su Huaihong, et al. GPS-based information collection technology for agriculture mobile management[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.): 169 ~ 172. (in Chinese)
- 66 夏于, 孙忠富, 杜克明, 等. 基于物联网的小麦苗情诊断管理系统设计与实现[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5): 117 ~ 120.
Xia Yu, Sun Zhongfu, Du Keming, et al. Design and realization of IOT-based diagnosis and management system for wheat production [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(5): 117 ~ 120. (in Chinese)
- 67 杨信廷, 吴滔, 孙传恒, 等. 基于 WMSN 的作物环境与长势远程监测系统[J]. 农业机械学报, 2013, 44(1): 167 ~ 173.
Yang Xinting, Wu Tao, Sun Chuanheng, et al. Remote monitoring system of crop environment and growing based on WMSN[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1): 167 ~ 173. (in Chinese)
- 68 朱伟兴, 戴陈云, 黄鹏. 基于物联网的保育猪舍环境监控系统[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 177 ~ 182.
Zhu Weixing, Dai Chenyun, Huang Peng. Environmental control system based on IOT for nursery pig house [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(11): 177 ~ 182. (in Chinese)
- 69 白红武, 胡肆农, 王立方, 等. 基于 GIS 的生猪及产品物流与追溯平台构件化设计[J]. 江苏农业学报, 2008, 24(5): 711 ~ 715.
Bai Hongwu, Hu Yinong, Wang Lifang, et al. Design of swine and pork logistics and traceability platform based on GIS [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2008, 24(5): 711 ~ 715. (in Chinese)
- 70 Marra F, Romano V. A mathematical model to study the influence of wireless temperature sensor during assessment of canned food sterilization [J]. Journal of Food Engineering, 2003, 59(2 ~ 3): 245 ~ 252.