

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.033

地面多角度农业遥感观测装置设计与试验^{*}

张东彦¹ 王秀¹ Coburn Craig² 王之杰² 赵晋陵¹ 郝强¹

(1. 北京农业信息技术研究中心, 北京 100097; 2. 莱斯布里奇大学地理学院, 莱斯布里奇 T1K 3M4)

摘要: 针对现有多角度对地观测设备存在机动性差、操作周期长、无法搭载较重仪器等问题, 设计了一种面向作物信息快速获取的地面多角度农业遥感观测装置(GAMOD)及信息采集控制系统, 利用该装置同步搭载高清相机和可见-近红外成像光谱仪(VNIHS)进行大田观测, 耗时10 min(所需时间由观测角度决定)可快速获取太阳主平面(0°、180°)和垂直太阳主平面(90°、270°)下4个观测天顶角(0°、20°、40°、60°)的大豆植被影像数据。结果表明: 该装置及控制软件运行良好, 在多角度观测方式支持下, 能有效捕捉到大豆植被三维立体的结构信息。

关键词: 作物信息 对地观测 遥感 多角度

中图分类号: S127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)01-0174-05

Design and Experiment of Ground-based Agriculture-oriented Multi-angle Observation Device

Zhang Dongyan¹ Wang Xiu¹ Coburn Craig² Wang Zhijie² Zhao Jinling¹ Hao Qiang¹

(1. Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China

2. Department of Geography, University of Lethbridge, Alberta T1K 3M4, Canada)

Abstract: Currently, most existing multi-angular earth observation equipments are inflexible, have long operation time and light pay-load capacities. To overcome the limitations mentioned above, the ground-based agriculture-oriented multi-angle observation device (GAMOD), oriented to fast acquire crop multi-angular data, was designed. The GAMOD was tested in a soybean field with visible/near-infrared imaging hyperspectral spectrometer (VNIHS) mounted on. It takes 10 min to acquire multi-angular data at four view zenith angles of 0°, 20°, 40° and 60°, under azimuth angles of 0°, 90°, 180° and 270°, respectively. As a result, 3-D structure information of soybean group can be effectively captured by supporting of multi-angular observation.

Key words: Crop information Earth observation Remote sensing Multi-angle

引言

相比传统的垂直对地观测, 地面多角度观测能够有效捕捉作物冠层结构的多维遥感信息, 有助于促进农业遥感定量化研究的发展^[1-2]。为了弄清楚病虫害在作物不同结构层次上的传播趋势及影响程度, 有必要开展立体结构上的观测研究^[3]; 为了对经济果树喷药后的药效进行准确评价, 需要采集果树立体三维结构信息^[4]; 为了提出可靠的作物辐射方向性定量模型, 需要获取从可见光到热红外的多

角度遥感观测数据^[5]。

基于上述多角度观测研究在农业实际生产上的潜在价值, 研发用以架设各种田间遥感传感器的多角度观测装置受到研究者的关注。经调研发现, 国内外田间观测专用的各种遥感辐射测量仪器在不断地更新换代, 但用于农业遥感定量化研究的观测装置却鲜有报道^[6]。目前, 已有的多角度测量装置主要用于: ①航天大尺度观测, 如美国 JPL 实验室的 PARABOLA 便携式地表及大气各向异性测量装置^[7-8], 它在各个角度所测量的目标位置是变化的,

收稿日期: 2012-08-10 修回日期: 2012-08-30

^{*} 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2011CB311806)和国家自然科学基金资助项目(41071228、41101395)

作者简介: 张东彦, 助理研究员, 主要从事农业定量遥感及观测装置的开发与应用研究, E-mail: zhangdy@nercita.org.cn

通讯作者: 王秀, 研究员, 主要从事精准农业装置开发与应用研究, E-mail: wangx@nercita.org.cn

不能保证目标地物的均匀性。②地面小尺度应用,更多适用于地面遥感观测。如美国 Nebraska 大学发明了适合于野外作业的大型机械手 Hercules 和 Goliath^[9],可以进行地表发射辐射和热辐射的全方位多角度自动测定,但是该设备结构复杂,成本高。瑞士苏黎世大学遥感实验室研发了 FIGOS 装置^[10],它采取方位圆形轨道和天顶弧架构,能在短时间内进行自动观测,但是容易受天顶弧的阴影影响,测量高度唯一。中国科学院地理科学与资源研究所发明了一种全方位多角度地面测定平台^[11],虽然可以实现目标物全方位多角度的测量,但是观测架本身的阴影严重影响了观测数据质量,局限于特定遥感观测领域,且无法搭载多种仪器实现同步观测。北京师范大学提出了一种便携式手动多角度观测架^[12],解决了遥感观测中高度唯一、便携性差、阴影干扰大的问题,但是它同样存在观测平台载质量小、无法搭载其他仪器的问题。北京农业智能装备技术研究中心设计了移动多角度观测平台^[13],能够实现对同一热点进行全方位、多角度观测,且传感器距目标物体的位置可调,但是存在角度变动操作时间长,观测臂高度不可调,不同观测角度下观测目标容易发生变化。加拿大 Lethbridge 大学发明的多角度观测装置 ULGS-2.0 能搭载 2 个 Ocean Optics USB-4000 型光谱仪(一个记录上行辐射,一个记录下行辐射)^[14],但 ULGS-2.0 不能搭载体积大、质量大的成像光谱设备。在 ULGS-2.0 的基础上,Lethbridge 大学又研发了 ULGS-2.5^[15],该系统能同时搭载 2 个光学传感器用于地物 BRDF 观测研究,由于天顶角和方位角变化采用人工调整,花费时间较长,且搭载平台容易造成较大的观测阴影,影响到多角度观测数据的精度。

综上所述,用于地面农业遥感领域,且能同步搭载多个传感器,实现多角度、多用途观测的多角度装置还未见报道。本文开发一种面向作物信息快速获取的多角度观测装置及信息采集控制系统,克服现有装置及设备机动性差、操作周期长、无法搭载较重仪器(如成像光谱仪、高清相机等)的缺点。通过大田环境下的实际操作试验,验证软件控制与硬件运行的可靠性,为实现多角度农业遥感量化研究提供设备支持。

1 总体结构与工作原理

1.1 总体结构

地面多角度农业遥感观测装置 GAMOD (Ground-based agriculture-oriented multi-angle observation device) 由实体设备和控制系统两部分组

成。实体设备包括:四轮驱动车、支撑架、长度可调的横梁、弧形轨道、仪器小车、涡轮电动机与步进电动机、用于配重与供电的蓄电池、控制观测架方向的开关等。控制系统包括:工控计算机、控制电路及连接线等。观测装置总体结构示意图如图 1 所示。

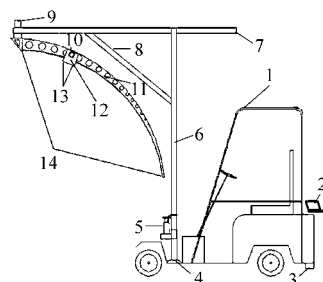


图 1 多角度观测装置示意图

Fig. 1 Diagrammatic drawing of multi-angle observation device

1. 四轮驱动车 2. 工控计算机 3. 用于配重与供电的蓄电池
4. 观测架底盘 5. 控制观测架移动方向的开关 6. 支撑架
7. 长度可调的横梁 8. 起固定作用的斜撑 9. 涡轮电动机 10. 步进电动机 11. 滑动链条 12. 搭载仪器的面板 13. 仪器小车
14. 弧形轨道

1.2 工作原理

多角度观测装置工作时,启动四轮驱动车行驶至观测地点,选择好观测区域,把仪器小车降至最低点,搭载好观测仪器(成像光谱仪、高清相机等),通过工控计算机及控制电路使其上升至天顶角 0° 。在完成上述工作后,根据研究需求,由控制软件按默认工作模式,即以角度间隔为 5° 、 10° 、 20° 中的任意天顶角设置运动,至终点停止,用以采集天顶角变化下的观测数据;或以角度间隔为 20° 、 90° 中的任意方位角设置运动,至原点停止,用以采集方位角变化下的观测数据。在实际观测试验时,科研人员可以在人机交互控制软件中实现天顶角、方位角的任意角度采集及某一观测角度下停留时间设置,从而满足不同研究需求。

1.3 性能指标

目前,国内外同种类型的多角度观测装置鲜有报道,为了体现该装置的设计优势,表 1 列出主要部件的技术参数。

表 1 主要部件的性能指标

Tab. 1 Performance indicators of key components

| 部件名称 | 性能指标 |
|-------|---|
| 天顶角控制 | 角度误差在 1° 以内 |
| 方位角控制 | 采用涡轮电动机的自锁功能,防止弧形轨道晃动,有效提高观测试验的数据精度 |
| 弧形轨道 | 半径为 2 m 的 $1/4$ 圆,有效观测角度 $0^\circ \sim 85^\circ$,国内首创 |
| 仪器小车 | 5 块铝合金面板和步进电动机焊接后由滑动链条带动其移动,可同步搭载 4 个传感器,电动机有效升降时的最大承载量为 25 kg,国内首创 |

2 主要工作部件设计

2.1 弧形轨道设计

弧形轨道由一块完整的铁板弯曲成半径为 2 m 的 1/4 圆后再切割成水平与垂直板为一体的滑行轨道,该设计能够避免组合板在长时间使用后因板块焊接点脱落而引起的仪器损伤。其中,水平板用于仪器小车在轨道上滑动和滑动链条移动,两边各为滑轮留有 6 cm 的活动区间;垂直板用于识别弧形角度和固定滑动链条的一端,每 5° 一个标记圆,共计 17 个圆,有效的观测角度范围为 0° ~ 85°。为了满足遥感观测时角度变化的准确记录,用色彩条在弧形轨道上进行刻度标识,其中 5°、10°、20° 以不同的颜色表示。上述弧形轨道的制作及细节构思属于国内首创,示意图如图 2 所示。

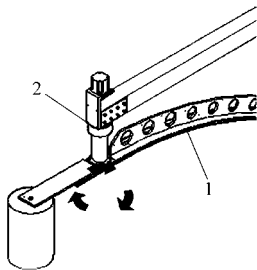


图 2 弧形轨道及方位角控制部件示意图

Fig.2 Diagrammatic drawing of arc circle and azimuth controller

1. 弧形轨道 2. 涡轮电动机

2.2 方位角控制部件设计

在遥感观测试验中,目标地物的多维信息获取受观测方位的影响较大^[16-17],因此,方位角的实时准确控制,是观测装置必须考虑的问题。2.1 节中,弧形轨道的材质是铁板,质量较大,在角度快速变化后会出现左右晃动的不稳定情况。为了解决这个问题,本文选用涡轮电动机防止弧形轨道晃动(图 2)。因其具有角度自锁功能,在观测方位角变换后,电动机卡槽使弧形轨道很快处于静止状态,这有利于遥感观测数据的准确获取。国内外已出现的多角度观测装置,方位角变化大都采用人工操作,人为因素会造成较大角度误差;有些虽然采用控制软件操作,因方位角变化少,主要用于天顶角变化控制。因此,本文的方位角控制设计具有一定的创新性。

2.3 仪器小车设计

仪器小车由步进电动机作为动力源,引导滑动链条带动其在弧形轨道上运动,用于天顶角变化下的数据采集。它主要由步进电动机、滑动链条、观测面板、滑轮等构成。其中,步进电动机具有可控性强,采集数据精度高等优点。它的步距角为 1.8°,

采用 16 细分的驱动器,角度精度可达到 0.1°。当搭载仪器较轻时,仪器小车的滑轮咬合力强,天顶角的实际误差小于 0.5°;当搭载仪器较重时,滑轮咬合力下降,在最大承载量下(25 kg)天顶角的实际误差也小于 1°。滑动链条由超高分子量聚乙烯制成,耐磨实用,既减小弧形轨道整体的质量,又便于电动机牵引。当电动机齿轮在上面运动时,摩擦因数大,便于控制(图 3a)。观测面板以正方形结构组合而成(5 块面板),底板与步进电动机焊接,其他 4 块用螺丝固定在底板上,可卸载,用于搭载多个类型的传感器(如成像光谱仪、高清相机)等(图 3b),从而实现多传感器同步采集数据。观测面板材质选用铝合金,具有质量小、结实、散热快等优点。查阅国内外研究文献,上述仪器小车及其附属装备未见报道。

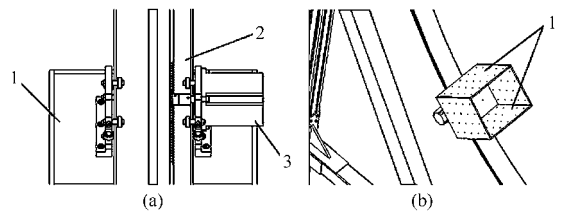


图 3 仪器小车及面板示意图

Fig.3 Diagrammatic drawing of moving equipment and panels

1. 搭载仪器的面板 2. 步进电动机 3. 滑动链条

3 控制系统设计

3.1 控制器设计

控制器由工控计算机、控制线路、电源线等组成。控制器的工作流程是:由 12 V 车载蓄电池经逆变器输出 220 V 交流电压,分别向工控计算机和 24 V 开关电源提供稳定电源。24 V 开关电源向天顶角步进电动机、方位角涡轮电动机、步进电动机控制器及其驱动器提供直流电压(工作过程如图 4)。

该系统包括天顶角步进电动机、方位角步进电动机限位信号的检测处理。SMC6480 控制器通过 RS232 与上位机相连,并且提供了动态链接库,包含丰富的步进电动机运动控制函数以及控制器连接函数。通过调用步进电动机控制器自带的动态链接库中的函数,实现与计算机的连接和对 2 个步进电动机的方向、位移、速度的控制及其限位信号的处理。如图 4 所示,驱动器将控制器的信号经功率放大器放大后,驱动步进电动机运动,在细分处理下使步进电动机运行更加平稳,提高了控制系统的精度。

3.2 控制软件

多角度运行控制软件由 Visual Studio C++ 2008 编程语言编写实现,运行界面如图 5 所示。

主要实现下列功能:

(1)实现对不同天顶角(0° ~ 85°)、方位角(0° ~

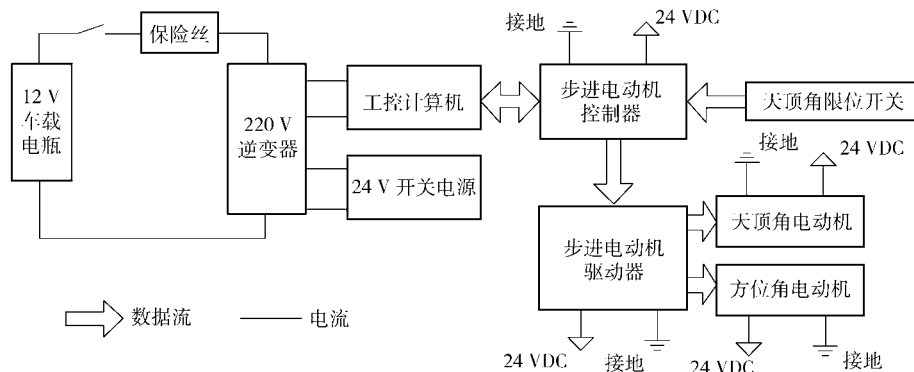


图 4 多角度控制器工作流程图

Fig. 4 Process flowchart of multi-angle controller

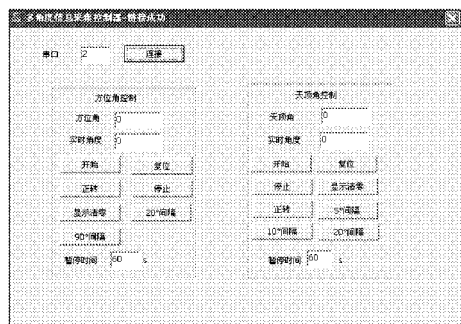


图 5 多角度信息采集控制软件界面

Fig. 5 Interface of multi-angle observation software

350°)的精确控制。

(2) 多角度控制可由已提供的角度间隔 (5°、10°、20°、90°) 自动实现,也可以根据研究需求自定义 (允许范围内的任何角度)。

(3) 人机交互界面,便于控制操作。

其中,弧形轨道顶部是天顶角的观测 0°,向下为正向运动 (正转),至 85° 停止。“天顶角”编辑框可设定目标值;“实时角度”动态显示角度变化情况,这两个变化可通过“开始”、“复位”、“停止”、“显示清零”等命令快速实现。参考已有研究文献,在实际遥感观测时,常用 5°、10°、20° 作为天顶角变化间隔,因此,本文开发的控制软件设置 3 种间隔的运行模式。研究者不必每次设定目标值,点击 3 种间隔模式的任意一种,步进电动机都会以固定的间隔停止,暂停用户事先设定的时间后继续运动 (由观测仪器工作时间决定)。3 种工作方式都要求步进电动机从 0° 天顶角位置为起点,在固定的角度下停顿,直至终点 85° 位置停止。

方位角以支架与天顶角运动弧形重合位置为原点 0°,以逆时针为正向运动。其他的操作过程与天顶角操作相同,这里不再赘述。方位角只设有“20° 间隔”和“90° 间隔”2 种常用工作方式。

4 试验

试验地点选在北京市昌平区小汤山镇国家精准

农业研究示范基地 (40. 18° N, 116. 45° E)。选取的观测对象为大豆 (幼苗分枝期),时间为 2011 年 9 月,观测时间为 9:00 ~ 15:30。采集多角度成像数据时,天气晴朗无云,微风。观测装置同时搭载高清相机 NIKON D50 与成像光谱仪 VNIHS,实现了多角度、多源遥感数据的同步获取。详细观测角度如图 6 所示 [14]。

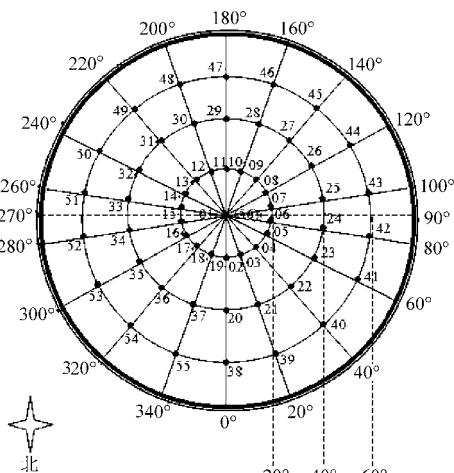


图 6 多角度观测顺序示意图

Fig. 6 Diagrammatic drawing of multi-angle observation sequences

在田间对大豆进行观测试验时,仪器采集时间 (每次 5 ~ 20 s),装置运动时间 (每次 10 ~ 20 s),天顶角每间隔 10° 观测一次,共 7 个变化角度,完成 0° ~ 60° 的观测;方位角每间隔 20° 观测一次,共 18 个变化角度,完成 0° ~ 350° 的观测;总共用时 10 min。图 7 和图 8 是不同种植密度下的大豆多角度假彩色组合图像。

图中,0° (0°)、0° (20°)、0° (40°)、0° (60°)、180° (20°)、180° (40°)、180° (60°) 代表太阳主平面观测时 0°、20°、40°、60° 4 个天顶角;90° (20°)、90° (40°)、90° (60°)、270° (20°)、270° (40°)、270° (60°) 代表垂直太阳主平面观测时的 4 个天顶角;a、b、c、d 代表方位角变化,e 代表垂直观测。

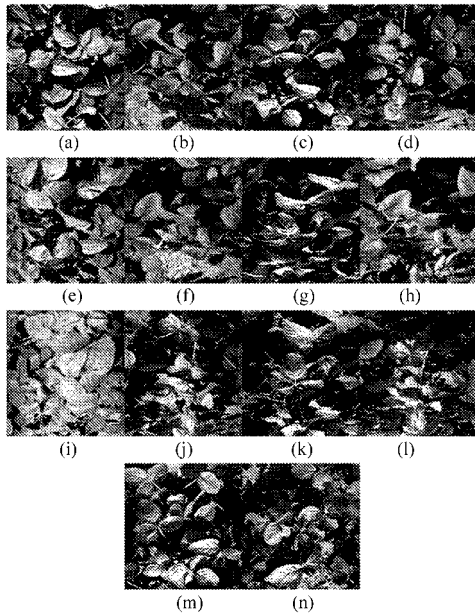


图7 不同角度下稠密大豆冠层的成像图

Fig. 7 Images of dense soybean canopy in different angles

- (a) $0^\circ(20^\circ)$ a1 (b) $90^\circ(20^\circ)$ b1 (c) $180^\circ(20^\circ)$ c1
 (d) $270^\circ(20^\circ)$ d1 (e) $0^\circ(40^\circ)$ a2 (f) $90^\circ(40^\circ)$ b2
 (g) $180^\circ(40^\circ)$ c2 (h) $270^\circ(40^\circ)$ d2 (i) $0^\circ(60^\circ)$ a3
 (j) $90^\circ(60^\circ)$ b3 (k) $180^\circ(60^\circ)$ c3 (l) $270^\circ(60^\circ)$ d3
 (m) 稠密 $0^\circ(0^\circ)$ e (n) 稀疏 $0^\circ(0^\circ)$ e

上述多角度成像图能够清晰反映观测范围内大豆植被的三维立体结构特征,直观地提供了视场内不同地物比例的变化情况。其中,2个种植密度在太阳主平面后向(0°)观测时,视场内以光照叶片为主;前向(180°)观测时以阴影叶片为主;在垂直太阳主平面时(90° 和 270°),视场内的土壤面积比例明显增加。这为农业遥感的量化分析研究提供了有效的数据支持。

参 考 文 献

- 1 王纪华,赵春江,黄文江,等. 农业定量遥感基础与应用[M]. 北京:科学出版社,2008:176~178.
- 2 Wu C Y, Niu Z, Wang J D, et al. Predicting leaf area index in wheat using angular vegetation indices derived from in situ canopy measurements [J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2010, 36(4): 301~312.
- 3 黄文江. 作物病害遥感监测机理与应用[M]. 北京:中国农业科学与技术出版社,2009:18~24.
- 4 Ye X, Sakai K, Asada S, et al. Interrelationships between canopy features and fruit yield in citrus as detected by airborne multispectral imagery [J]. Transactions of the ASABE, 2008, 51(2):739~751.
- 5 柳钦火,辛晓洲,唐娉,等. 定量遥感模型、应用及不确定性研究[M]. 北京:科学出版社,2010.
- 6 Zhang L F, Huang C P, Wu T X, et al. Laboratory calibration of the field imaging spectrometer system [J]. Sensors, 2011, 11(3):2408~2425.
- 7 Deering D W, Peter L. A sphere-scanning radiometer for rapid directional measurements of sky and ground radiance [J]. Remote Sensing of Environment, 1986, 19(1):1~24.
- 8 Abdou W A, Helmlinger M C, Conel J E, et al. Ground measurements of surface BRDF and HDRF using PARABOLA III [J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 106(D11): 11967~11976.
- 9 Deering D W, Middleton E M, Iron J R, et al. Prairie grassland bi-directional reflectance measured by different instruments at the FIFE site [J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(18): 887~903.
- 10 Sandmeier S T, Muller C H, Hosgood B, et al. Physical mechanisms in hyperspectral BRDF data of grass and watercress [J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 66(2): 222~233.

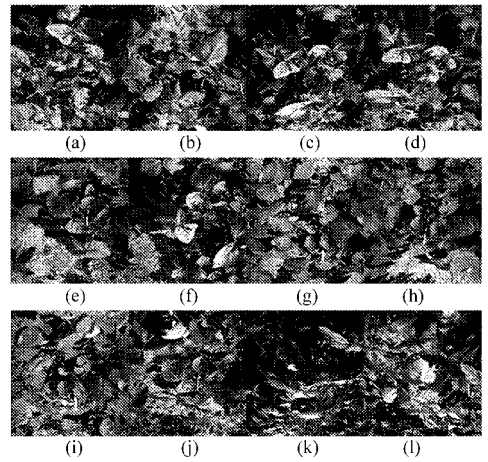


图8 不同角度下稀疏大豆冠层的成像图

Fig. 8 Images of thin soybean canopy in different angles

- (a) $0^\circ(20^\circ)$ a1 (b) $90^\circ(20^\circ)$ b1 (c) $180^\circ(20^\circ)$ c1
 (d) $270^\circ(20^\circ)$ d1 (e) $0^\circ(40^\circ)$ a2 (f) $90^\circ(40^\circ)$ b2
 (g) $180^\circ(40^\circ)$ c2 (h) $270^\circ(40^\circ)$ d2 (i) $0^\circ(60^\circ)$ a3
 (j) $90^\circ(60^\circ)$ b3 (k) $180^\circ(60^\circ)$ c3 (l) $270^\circ(60^\circ)$ d3

5 结 论

(1) 面向作物信息快速获取的多角度观测装置,机动性强、操作周期短,能同时搭载多个传感器获取目标地物的多源三维立体信息。

(2) 采用 Visual Studio C++2008 语言开发的控制程序与控制器构成多角度信息采集控制系统,具有人机交互、操控性强的特点。

(3) 在大豆田间观测试验时,获取的成像图清晰明了,以三维立体的方式再现了大豆的结构信息,由此证明该装置及控制软件运行良好,初步实现了多角度观测装置的基本功能。

- Yang Wei, Lü Ke. Control based on ZigBee technology for greenhouse wireless smart terminal development[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(3): 198 ~ 202. (in Chinese)
- 13 王翥, 魏德宝, 王玲, 等. 基于 WSN 的温室大棚温湿度监测系统的设计[J]. 仪表技术与传感器, 2010(10): 45 ~ 48.
Wang Zhu, Wei Debao, Wang Ling, et al. Based WSN greenhouse temperature and humidity monitoring system design[J]. Instrument Technique and Sensor, 2010(10): 45 ~ 48. (in Chinese)
- 14 张荣标, 谷国良, 冯友兵. 基于 IEEE 802.15.4 的温室无线监控系统的通信实现[J]. 农业机械学报, 2008, 39(8): 119 ~ 122, 127.
Zhang Rongbiao, Gu Guoliang, Feng Youbing. Communication system based on a IEEE 802.15.4 the greenhouse wireless monitoring[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(8): 119 ~ 122, 127. (in Chinese)
- 15 骆凯, 李森, 胡泽林. 基于 WSN 的农业信息远程监控系统的设计与实现[J]. 自动化与仪器仪表, 2008(4): 14 ~ 17.
Luo Kai, Li Miao, Hu Zelin. Design and implementation of WSN-based remote monitoring system of agricultural information[J]. Automation and Instrumentation, 2008(4): 14 ~ 17. (in Chinese)
- 16 曹雨, 吴云, 赵勇, 等. 基于 Hi3511 视频监控系统的设计与实现[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(20): 4 592 ~ 4 595, 4 602.
Cao Yu, Wu Yun, Zhao Yong, et al. Design and implementation based the Hi3511 video surveillance system[J]. Computer Engineering and Design, 2009, 30(20): 4 592 ~ 4 595, 4 602. (in Chinese)
- 17 蔡文晶, 秦会斌, 程春荣. 基于 CC2430 片内温度传感器的温度监测系统[J]. 电子器件, 2010, 33(3): 45 ~ 47.
Cai Wenjing, Qin Huibin, Cheng Chunrong. Temperature monitoring system based on the CC2430 chip temperature sensor[J]. Electronic Devices, 2010, 33(3): 45 ~ 47. (in Chinese)
- 18 王黎丽, 陈曾杰. 基于 ZigBee 的温湿度测量系统[J]. 中国新技术新产品, 2011(16): 12 ~ 13.
Wang Lili, Chen Zengjie. ZigBee temperature and humidity measurement system[J]. New Technology and New Products, 2011(16): 12 ~ 13. (in Chinese)
- 19 王建, 毛腾飞, 陈英革. 基于 BH1750 芯片的测光系统设计与实现[J]. 常熟理工学院学报, 2011, 25(2): 117 ~ 120.
Wang Jian, Mao Tengfei, Chen Yingge. Based the BH1750 chip metering system design and implementation[J]. Changshu Institute of Technology, 2011, 25(2): 117 ~ 120. (in Chinese)
- 20 于欣, 郭娟. 面向 3G 的 H.264/AVC 压缩视频通信技术[J]. 河北大学学报, 2010, 30(3): 333 ~ 336.
Yu Xin, Guo Juan. H.264/AVC compressed video communication technology for 3G[J]. Hebei University of Technology, 2010, 30(3): 333 ~ 336. (in Chinese)
- 21 毕厚杰. 新一代视频压缩编码标准——H.264/AVC[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008.
- 22 夏小为. 无线多媒体传感器节点的设计与实现[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
Xia Xiaowei. Design and implementation of wireless multimedia sensor nodes[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 178 页)

- 11 中国科学院地理科学与资源研究所. 一种全方位多角度测定平台: 中国, 02160132. 1 [P]. 2004-07-21.
- 12 北京师范大学. 便携式手动多角度观测架: 中国, 200910077927 [P]. 2009-07-08.
- 13 北京农业智能装备技术研究中心. 移动多角度观测平台及使用其的观测方法: 中国, 101726733A [P]. 2010-06-09.
- 14 Wang Z, Coburn C A, Ren X, et al. Assessment of soil surface BRDF using an imaging spectrometer[C] // Proceedings of SPIE, Belgium, 2010.
- 15 Wang Z, Coburn C A, Ren X, et al. Effect of soil surface roughness and scene components on soil surface bidirectional reflectance factor[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2012, 92(2): 297 ~ 313.
- 16 李小文. 地物的二向性反射和方向谱特征 [J]. 环境遥感, 1989, 4(1): 67 ~ 72.  
Li Xiaowen. The two reflective and directional spectrum characteristics of objects[J]. Remote Sensing of Environment, 1989, 4(1): 67 ~ 72. (in Chinese)
- 17 Coburn C A, Peddle D R. A low-cost field and laboratory goniometer system for estimating hyperspectral bi-directional reflectance [J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2006, 32(3): 244 ~ 253.