

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.035

# 四旋翼飞行器农田位置信息采集平台设计与实验\*

李继宇 张铁民 彭孝东 马学东 柯宙志 曾旭升

(华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642)

**摘要:** 作为对传统农田信息采集方式的补充,提出了一种基于小型飞行器的采集方式。阐述了四旋翼飞行器的工作原理,并设计了农田信息采集平台,制作出的样机载重为 3.5 kg,滞空时间大于 20 min。设计了惯性测量系统,在测试翻滚角误差小于 0.5°时确定融合算法权重系数  $K$  为 12,利用 PID 闭环控制,实现 3 m 高度悬停飞行的偏移误差不超过 5 m。在平台上搭载 Trimble 5700 型 GPS 接收机进行了实时数据采样实验,结果表明人工采样与飞行采样数据误差约为 1.4 m,表明该平台具有采集农田位置信息的基本能力。

**关键词:** 农田位置信息 四旋翼飞行器 惯性测量系统 飞行采样

**中图分类号:** S252; V275<sup>+.1</sup> **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)05-0202-05

## Collection Platform of Field Location Information Based on Four-rotor Aircraft

Li Jiyu Zhang Tiemin Peng Xiaodong Ma Xuedong Ke Zhouzhi Zeng Xusheng

(Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education,  
South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** As a supplement to the traditional field information collection, a collection method based on small aircraft was presented. The working principle of the four-rotor aircraft was introduced. Collection platform structure contained five parts of the field information was designed. The prototype load was 3.5 kg. The endurance time was longer than 20 min. An inertial measurement system was also designed. The fusion algorithm weight coefficient  $K$  of the system was 12 in the test when roll angle error was less than 0.5°. PID closed loop control was used to achieve hover flight in the height of 3 m and the offset error did not exceed 5 m. The platform equipped with a GPS receiver Trimble 5700 for the real-time data sampling experiments. The error between manual sampling and flight sampling data was 1.4 m. It indicated that the platform had the basic capability of the acquisition of farmland location information.

**Key words:** Farmland location information Four-rotor aircraft Inertial measurement system Flight sampling

### 引言

如何快速、准确地获取农田信息一直是农业工程领域关注的热点和难点,也是“精细农业”技术体系中一个重要环节。目前我国获取大面积农田信息

的主要方式还是卫星遥感(RS)技术,近30年来,RS技术在大面积作物产量预测,农情宏观预报等方面做出了重要贡献。由于卫星遥感数据目前尚达不到必要的空间分辨率和提供满足农作需要的实时性<sup>[1]</sup>,使其在“精细农业”实施中的作用受限。由于

收稿日期:2012-06-05 修回日期:2012-07-28

\* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(SS2013AA100303)、机器人学国家重点实验室开放课题资助项目(RL2012-002)和广东省大学生科技创新项目211学科建设基金资助项目(1056411143)

作者简介:李继宇,博士生,主要从事农业航空应用技术研究,E-mail:lijiyu@scau.edu.cn

通讯作者:张铁民,教授,博士生导师,主要从事农业航空、农业电气化与自动化研究,E-mail:tm-zhang@163.com

提高空间分辨率、具有快速实时性、获取的信息准确易解析、具有连续获取高密度信息等要求已经超越了卫星遥感的能力范围,因而需要一种新的稳定获取农田信息的方式<sup>[2]</sup>。本文针对现有获取农田信息的卫星遥感、航空遥感技术大多面向较大农田面积或是较平坦的区域,且技术本身存在的不足<sup>[3]</sup>,根据我国南方山区、丘陵及小地块等特点,提出基于四旋翼飞行器的低空农田信息采集平台,并针对GPS数据的获取进行实验。

## 1 四旋翼飞行器概述

四旋翼飞行器(Four rotors helicopter)是一种能够垂直起降(Vertical take off and landing)、自由悬停、多姿态飞行的电力驱动、多旋翼式飞行器。与常规的旋翼式飞行器相比,其总体结构布局属于非共轴式飞行器。由于结构的对称性,四旋翼在机械结构与控制方式上有很多优势,如图1所示,旋翼A、C顺时针旋转,旋翼B、D逆时针旋转,使得整个机身扭矩自动平衡,同时通过调节两对旋翼所产生的升力和扭矩大小来控制飞行器的姿态<sup>[4]</sup>。与传统的单旋翼直升机结构相比,四旋翼无需尾翼来平衡机身扭矩,节约机身能源;与较大旋翼飞机相比,四旋翼机的旋翼一般更小,转速更高,其效率也更高<sup>[5-7]</sup>。

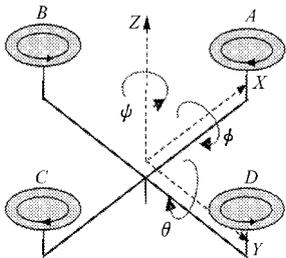


图1 四旋翼飞行原理

Fig.1 Flight theory of four-rotors

基于四旋翼飞行器的信息采集平台相对于其他飞行器的结构更简单,改变飞行器的功能与控制算法更方便,这一点决定了四旋翼飞行器在科学研究中扮演重要角色。市场上也涌现出一批四旋翼飞行器商品,如XAircraft公司推出的X650型可以配置13个传感器,分别用来检测飞行姿态、高度、方向、位置、温度、功耗。但目前鲜见飞行器在农田信息检测中的应用及实际飞行测试的实验数据。

## 2 信息采集平台结构及其惯性测量系统设计

四旋翼飞行器成本低、能够低空实现悬停飞行、具有一定的载荷能力、具有导航和通信能力等特点都符合采集农田信息的要求,同时可通过携带小负

载完成农田信息采集的模拟飞行等实验。平台自身在空中的稳定性能成为检测农田信息的必要条件,针对飞行器稳定性问题,设计了四旋翼信息采集平台及惯性测量系统,并开展了飞行测试的实验研究。

### 2.1 信息采集平台结构

四旋翼平台主要包含电源、通信、数据处理与控制、传感器以及电动机执行等部分,如图2所示。

电源部分由容量为5 500 mA·h的锂电池及电压转换电路构成,单片电池的电压为3.7~4.2 V,报警电压3.7 V,质量390.5 g;设计时候需要充分考虑电池质量、体积以及功率大小所构成的效率问题。

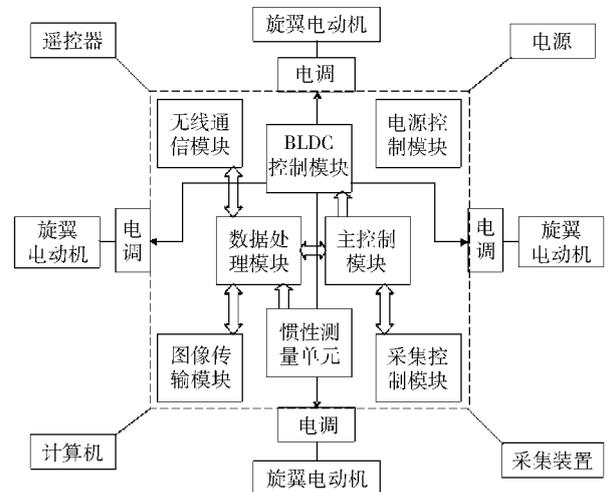


图2 信息采集平台结构

Fig.2 Structure of information collection platform

通信部分则由无线通信模块与遥控器组成。发射器型号T6EXHP,传输频率72 MHz,调制为PCM模式,电源电压9.6 V,电流250 mA;接收器型号R138DP,接收频率同传输频率,调制模式为PCM模式,电源电压4.8 V,电流16 mA,质量40.3 g。遥控器在起飞与降落时对设备发出姿态与控制命令,接收机将接收到的信息送给数据处理模块进行处理,处理后产生控制命令,完成对飞行器姿态的人工辅助遥控操作。利用900 MHz数传电台则可以实现长距离单点地面站控制自主飞行。

飞行器完成低空航拍任务时,采用的图像传输模块发射功率达到500 mW,工作频率1.2 GHz,工作电压12 V,工作电流300~400 mA,尺寸为73 mm×41 mm×14 mm,质量仅为82 g;与地面微机之间则采取单独的通信协议与传输速率。农业领域近地面环境不复杂,干扰源少,对通信链技术的可靠性、安全性、抗干扰要求低。

采用Atmega128A单片机作为四旋翼平台的控制器,具有6路分辨率可编程PWM通道,32个8位通用工作寄存器,53个可用I/O口能够充分保证对

不同信息量的采集预处理,通过PID控制对4个直流无刷电动机完成差速控制任务。数据处理模块根据惯性测量单元检测到的位置与姿态信息进行分析,主控制模块根据数据分析结果发出姿态与位置命令,通过电动机执行部分实现飞行器的自悬停飞行功能。同时实现对农田信息采集传感器的控制。

电动机执行部分包括电子调速器、直流无刷电动机与旋翼及其附件,采用XM5015TE-6 372KV型大扭矩盘式无刷电动机,最大电流达到35A;XC6018BA V2型电子调速器接收控制模块的PWM指令,调节电流用以控制无刷直流电动机转速,从而完成对4个旋翼转速的控制。

目前设计的飞行器样机基本参数如表1所示。

表1 样机基本参数

Tab.1 Basic parameters of prototype

| 型号     | 测试方式   | 整机质量/<br>g | 负载质量/<br>g | 直流无刷<br>电动机      | 续航时间/<br>min | 电池容量/<br>mA·h | 机身直径与<br>高度/mm × mm | 可扩展功能    |
|--------|--------|------------|------------|------------------|--------------|---------------|---------------------|----------|
| SCAU-I | 三自由度机架 | 1 500      | 3 500      | XM5015TE-6 372KV | >20          | 5 500         | 575 × 120           | 农田位置信息采集 |

## 2.2 惯性测量系统设计与测试

惯性测量系统由陀螺仪、加速度、磁阻等惯性测量单元以及GPS等多个姿态传感器数据融合后与PID算法构成。其控制闭环结构如图3所示。其中三轴加速度传感器能够精确地提供静态飞行器与水平面的俯仰与翻滚角度,磁阻传感器能够提供静态飞行器在水平面的偏航角度<sup>[8~10]</sup>,当飞行器在任一方向发生继续偏移时,陀螺仪能迅速检测到继续偏移的角速度,并对其积分得到继续偏移的角度,而飞行器的电动机振动量所产生的干扰也会被惯性测量系统检测出来,故必须对测量数据按照算法进行有效融合,才能够实时得到准确的机身姿态角。



图3 闭环控制结构框图

Fig.3 Closed-loop control

数据融合的算法核心思想类似于卡尔曼滤波算法,两者都是对各传感器测量的数据进行可靠性评估,通过不同的权重系数来分配各传感器测量数据在最终融合数据中的份额,最终计算出实际的姿态角;不同之处在于卡尔曼滤波的权重系数取决于实时测量误差的大小,而本算法的权重系数将通过实验方法测量出可靠值后不再改变。其好处是算法对系统的要求降低,非常适用于嵌入式微机电系统的应用。算法的输入值对应各传感器的实际测量值计算出来的姿态向量,分别是加速度传感器测量值 $A_{CC}(n)$ (翻滚角、俯仰角)、陀螺仪向量 $G_{YR}(n)$ 和磁阻仪向量 $M_{AC}(n)$ ,输出值为融合后的飞控板姿态角向量 $F_U(n)$ ,算法流程如图4所示,其中 $n-1$ 、 $n$ 表示测量间隔时间点。算法中偏航角的计算公式为

$$M_{AC}(0) = F_U(0) \quad (1)$$

$$G_{YR}(n) = f(F_U(n-1)) \quad (2)$$

$$F_U(n) = \frac{M_{AC}(n) + G_{YR}(n)K}{1+K} \quad (3)$$

式中  $K$ ——权重系数

其中式(2)是与 $F_U(n-1)$ 相关的陀螺仪角速度值由一系列计算式推算出 $G_{YR}(n)$ ,过程较复杂,这里仅用函数的形式表示系数; $K$ 则由实验的方法测定。

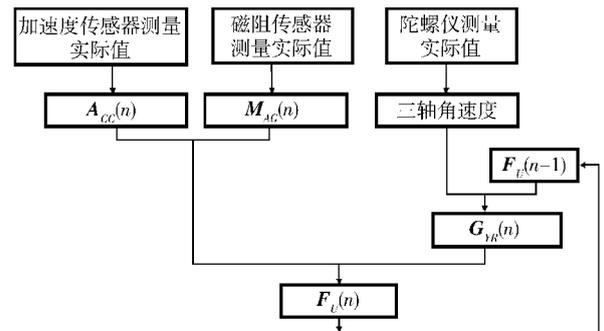


图4 融合算法框图

Fig.4 Data fusion algorithm

各姿态角权重系数 $K$ 的实验测定方法如下:以测量翻滚角为例,首先手持飞控板尽量保持垂直地面轴向不变,在水平面上沿系统坐标系轴线方向大角度翻滚飞控板,同时模拟实际飞行时由电动机带来的振动干扰量。在一定范围内预测 $K$ 值;然后将飞控板固定在偏转角范围为 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 的旋转平台进行测量,根据实验结果微调 $K$ 值,当融合算法输出姿态角与旋转平台的实际姿态角误差值小于 $0.5^\circ$ 时即可认为 $K$ 值能够满足系统稳定的要求。确定 $K$ 值之后再手持飞控板的测量数据 $A$ 与融合算法计算值 $F$ 通过串口输入到计算机显示对比验证,取出100个采样数据点(系统周期3.1s)作图如图5所示。其中振荡幅度较大曲线为加速度传感器计算出的 $A$ 值,较平滑曲线为 $F$ 值。从图5中可以看出,经过算法的有效数据融合后,平滑的曲线能够

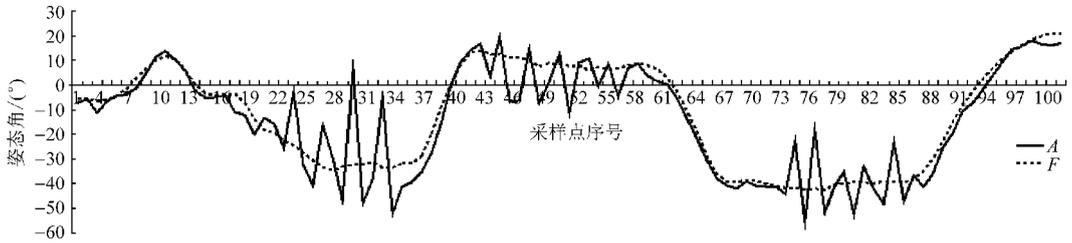


图5 融合数据对比

Fig. 5 Integration of data comparison

融合振动量带来的干扰而将飞控板的翻滚姿态精确的描述出来,实验测定的翻滚角权重系数  $K$  为 12。相类似的方法,俯仰角与偏航角的权重系数分别为 10 和 15。

在空地处定高、定点悬停飞行器,测试增稳系统的稳定效果,开启无线传输模块将飞机的实时倾角传输到计算机,可以实时绘制出倾角-时间波形图。抽取出现悬停时连续数据(100 个数据点,系统周期 3.1 s),对误差大的数据滤波之后在 Excel 表中成雷达图样式,飞行器中心点与地面信息采集中心点的偏移距离如图 6 所示,在采样高度 3 m,可以看出偏移距离基本稳定在 5 m 范围之内,满足普通摄像头的视角范围要求,不会产生明显的信息采集误差,基本能够实现飞行器的定点悬停飞行。

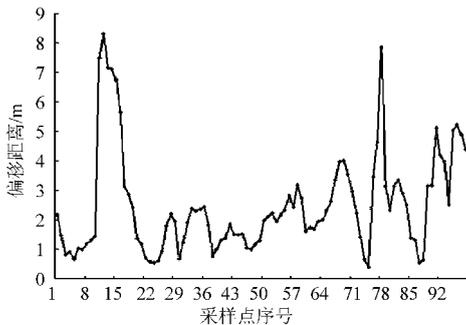


图6 偏移距离

Fig. 6 Offset distance

### 3 农田位置信息实时获取实验

农田位置信息主要包括采样点的经纬度,所在田块的形状与面积等<sup>[11]</sup>。而利用 GPS 数据实时快速获取任意农田形状与面积,快速定位田间某点坐标是农田信息采集研究的问题之一。可以将 GPS 传感器安置在低空平台,利用飞行器快速、稳定的低空飞行能力沿农田边界飞行,通过无线传输功能实时发射边界数据至计算机处理后成图,是初步利用低空平台采集农田信息的一种有效方式。

实验采用差分式厘米级精度的 Trimble 5700 型 GPS 接收机。5700 型接收机是一款 24 通道的双频 RTK GPS 接收机,具有先进的 Trimble Maxwell™ 技术,水平精度 2 cm,垂直定位精度 3 cm,输出频率可

达 20 Hz,动态延迟小于 20 ms;其初始化时间小于 10 s(一般情况下),初始化可靠性大于 99.9%(一般情况下)。接收机具有内部集成的 UHF 无线电调制解调器,能够提供 RTK (Real-time kinematic) 通信,无需电缆或附加电源。

为方便测试及数据比较,实验地点选择一块较规则矩形农田,长 28.1 m,宽 26.2 m。分别采用人工携带 GPS 接收机行走、四旋翼飞行器由地面站控制自主飞行沿农田边界循环一周(天线安装在四旋翼中心,高出旋翼平面 50 mm),将边界 GPS 数据实时传送到地面站中。对 2 组采样数据进行处理后,分别成图对比飞行器控制精度与效率。步行采样时间是 155 s,行走距离为 110 m,采样平均速度为 0.71 m/s;飞行器飞行采样时间是 65 s,飞行距离约为 110 m,采样平均速度为 1.69 m/s。

## 4 实验数据处理与分析

### 4.1 实验数据处理

步行采样从 Trimble 5700 型 GPS 导出的原始数据为: \$GPGGA, 011052.95, 2309.72952312, N, 11320.97613363, E, 4, 8, 1.1, 31.931, M, -6.516, M, 1.9, 0011 \* 5B, 其中第 3 位是纬度 23°09.72952312',第 5 位是经度 113°20.97613363',第 7 位“4”表示 GPS 状态为 RTK - DGPS(厘米级)定位方式,数据精度得到保证。

GPS 中读取的数据属于 WGS - 84 大地坐标系数据,为计算采样数据的误差,需要将其通过 Gauss - Kruger 投影变换转换至平面坐标,公式<sup>[12]</sup>为

$$\begin{aligned}
 x &= X' + \frac{l^2}{2} N \sin B \cos B + \\
 &\frac{l^4}{24} N \sin B \cos^3 B (5 - t^2 + 9\eta^2 + 4\eta^4) + \\
 &\frac{l^6}{720} N \sin B \cos^5 B (61 - 58t^2 + t^4) \quad (4) \\
 y &= l N \cos B + \frac{l^3}{6} N \cos^3 B (1 - t^2 + \eta^2) + \\
 &\frac{l^5}{120} N \cos^5 B (5 - 18t^2 + t^4 + 14\eta^2 - \\
 &58\eta^2 t^2) + 500\,000 \quad (5)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{其中} \quad l &= L - L_0 \quad N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}} \\ e &= 2\delta - \delta^2 \quad t = \tan B \quad \eta = e' \cos B \\ e' &= \sqrt{a^2/b^2 - 1} \quad \delta = (a - b)/a \\ X' &= c \int_0^B (1 + e'^2 \cos^2 B)^{-3/2} dB \end{aligned}$$

式中  $L$ ——经度  $B$ ——纬度

$L_0$ ——投影带中央子午线经度

$N$ ——卯西圈曲率半径

$e$ ——椭球第一偏心率

$\eta$ ——辅助变量

$e'$ ——椭球第二偏心率

$a, b$ ——参考椭球的长、短半径

$\delta$ ——扁率  $c$ ——极曲率半径

$X'$ ——赤道至纬度为  $B$  平行圈的子午线弧长

使用投影坐标系的主要参数包括:投影方式 Gauss-Kruger;中央经线  $114.000\ 000^\circ$  (3度带);水平偏移量 500 km;地理坐标系 GCS\_WGS\_1984;大地参照系 D\_WGS\_1984;参考椭球体 WGS\_1984;椭球长轴 6 378 137.000 000;椭球扁率 0.003 352 810 7。

将原始经度与纬度数据代入式(4)、(5)中后计算得到单点平面坐标  $x = 2\ 562\ 644.560\ 757\ \text{m}$ ,  $y = 433\ 398.494\ 600\ \text{m}$ ;对采样数据进行批量转换,因实验农田的面积较小,故平面坐标数据只会在 100 m 范围以内变化,即小数点前 2 位。保留 10 位之后的数据如图 7 所示,图中外圈数据为飞行采样,内圈数据为人工采样。

#### 4.2 实验数据分析

图 7 中除矩形农田外的小段数据部分是飞机从田埂起飞和降落的数据,因为所采用的地面站控制方式为单点定位控制飞行,即飞行器每次只能飞往一个目标,在矩形转弯处需要重新设定目标,此时飞

行器会悬停在该点附近,需将拐角处大量重复无效数据删除。可以看出由地面站控制飞行方式精度较高,飞行轨迹较平直,其与人工采样的最大误差约为 1.414 m,基本能够满足精细农田信息采集的要求。

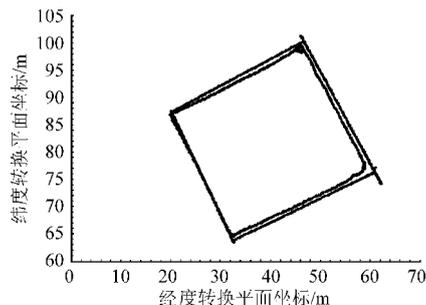


图 7 采样数据

Fig. 7 Sampled data

通过分析 GPS 接收机原始数据格式发现,在起飞与降落过程中 GPS 状态位不再是“4”,而是“5”或者“2”,表明此时 GPS 的定位数据精度不再是厘米级精度,而是亚米和米级精度。这是因为起飞与降落时电动机流变化较大,螺旋桨转速差较大,对 GPS 定位数据产生了一定的影响。可以通过优化四旋翼机架结构使得旋翼尽量远离 GPS 接收机所在位置的办法来解决。旋翼转速对于 GPS 接收机的影响是值得进一步研究的问题。

## 5 结论

(1) 装备了农田信息采集装置的低空平台是对现有农田信息采集方式的一种补充。

(2) 四旋翼飞行器平台操作简单,易于悬停,能够稳定低空低速飞行。

(3) 人工采样与飞行采样 GPS 实时获取数据误差小,约为 1.414 m,飞行采样方式能够满足农田信息采集的基本要求。

## 参 考 文 献

- 汪懋华. “精细农业”发展与工程技术创新[J]. 农业工程学报, 1999, 15(1): 1~8.  
Wang Maohua. Development of precision agriculture and innovation of engineering technologies[J]. Transactions of the CSAE, 1999, 15(1): 1~8. (in Chinese)
- 罗锡文, 臧英, 周志艳. 精细农业中农情信息采集技术的研究进展[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1): 167~173.  
Luo Xiwen, Zang Ying, Zhou Zhiyan. Research progress in farming information acquisition technique for precision agriculture[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(1): 167~173. (in Chinese)
- 李继宇, 张铁民, 彭孝东, 等. 小型无人机在农田信息监测系统中的应用[J]. 农机化研究, 2010, 32(5): 189~192.  
Li Jiuyu, Zhang Tiemin, Peng Xiaodong, et al. The application of small UAV(SUAV) in farmland information monitoring system[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(5): 189~192. (in Chinese)
- 聂博文, 马宏绪, 王剑, 等. 微小型四旋翼飞行器的研究现状与关键技术[J]. 光电与控制, 2007, 14(6): 113~117.  
Nie Bowen, Ma Hongxu, Wang Jian, et al. Study on actualities and critical technologies of micro/mini quadrotor[J]. Electronics Optics & Control, 2007, 14(6): 113~117. (in Chinese)
- Adbelhamid Tayebi, Stephen McGilvray. Attitude stabilization of a VTOL uadrotor aircraft[J]. IEEE Transactions on Control systems technology, 2006, 14(3): 562~571.

- Zheng Wen'gang, Sun Gang, Shen Changjun, et al. Development of a visible-infrared photoelectric instrument for measuring crop nitrogen [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010,26(3):178~182. (in Chinese)
- 11 张晓东,毛罕平,倪军,等.作物生长多传感信息检测系统设计与应用[J].农业机械学报,2009,40(9):164~170.  
Zhang Xiaodong, Mao Hanping, Ni Jun, et al. Intelligent detection system of multi-sensor information for growing crops [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(9):164~170. (in Chinese)
- 12 Zhang X, Li M, Liu G, et al. Development of a multi-spectral detector determining leaf chlorophyll content of the cucumber in a greenhouse [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2008, 24(6): 869~876.
- 13 孙刚,刘良云,郑文刚,等.基于夫琅和费暗线原理的太阳诱导叶绿素荧光仪[J].农业机械学报,2009,40(增刊):248~251.  
Sun Gang, Liu Liangyun, Zheng Wen'gang, et al. Development of a solar induced chlorophyll fluorescence monitor based on fraunhofer line principle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(Supp.):248~251. (in Chinese)
- 14 曹卫星.数字农作技术[M].北京:科学出版社,2008.
- 15 冯伟.基于高光谱遥感的小麦氮素营养及生长指标监测研究[D].南京:南京农业大学,2007.  
Feng Wei. Monitoring nitrogen status and growth characters with canopy hyperspectral remote sensing in wheat [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- 16 田永超,杨杰,姚霞,等.利用叶片高光谱指数预测水稻群体叶层全氮含量[J].作物学报,2010,36(9):1529~1537.  
Tian Yongchao, Yang Jie, Yao Xia, et al. Monitoring canopy leaf nitrogen concentration based on leaf hyperspectral indices in rice [J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(9):1529~1537. (in Chinese)
- 17 朱艳,吴华兵,田永超,等.基于冠层反射光谱的棉花干物质积累量估测[J].应用生态学报,2008,19(1):105~109.  
Zhu Yan, Wu Huabing, Tian Yongchao, et al. Estimation of dry matter accumulation in above-ground part of cotton by means of canopy reflectance spectra [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(1):105~109. (in Chinese)
- 18 周冬琴,田永超,姚霞,等.水稻叶片全氮浓度与冠层反射光谱的定量关系[J].应用生态学报,2008,19(2):337~344.  
Zhou Dongqin, Tian Yongchao, Yao Xia, et al. Quantitative relationships between leaf total nitrogen concentration and canopy reflectance spectra of rice [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(2): 337~344. (in Chinese)
- 19 朱艳,姚霞,田永超,等.稻麦叶片氮积累量与冠层反射光谱的定量关系[J].植物生态学报,2006,30(6):983~990.  
Zhu Yan, Yao Xia, Tian Yongchao, et al. Quantitative relationship between leaf nitrogen accumulation and canopy reflectance spectra in rice and wheat [J]. Journal of Plant Ecology, 2006, 30(6): 983~990. (in Chinese)
- 20 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.
- 21 徐希孺.遥感物理[M].北京:北京大学出版社,2005.
- 22 程开明,唐治德.模拟电子技术[M].重庆:重庆大学出版社,1995.

~~~~~

(上接第206页)

- 6 Tayebi A, McGilvray S. Attitude stabilization of a four-rotor aerial robot [C] // 43rd IEEE Conference on Decision and Control, 2004,2:1216~1221.
- 7 Bouabdallah S, Becker M, Siegwart R, et al. Autonomous miniature flying robots: coming soon! —research, development, and results [J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2007,14(3):88~98.
- 8 单海燕. DI/QFT 控制器在四旋翼无人直升机飞行控制中的应用[J].电光与控制,2008(3):31~40.  
Shan Haiyan. Combined DI/QFT flight control for a quad-rotor unmanned helicopter [J]. Electronics Optics & Control, 2008(3): 31~40. (in Chinese)
- 9 杨明志,王敏.四旋翼微型飞行器控制系统设计[J].计算机测量与控制,2008,16(4):485~490.  
Yang Mingzhi, Wang Min. Design of flight control system for a four-rotor mini rotorcraft [J]. Computer Measurement & Control, 2008,16(4):485~490. (in Chinese)
- 10 Zhao Xiaohui, Sanchez A, Lozano R, et al. Design and implementation of an embedded control system for small unmanned aerial vehicles; application to a four-rotor mini rotorcraft [C] // IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2009: 414~419.
- 11 王凤花,张淑娟.精细农业田间信息采集关键技术的研究进展[J].农业机械学报,2008,39(5):112~121.  
Wang Fenghua, Zhang Shujuan. Research progress of the farming information collections key technologies on precision agriculture [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(5):112~121. (in Chinese)
- 12 张智刚,罗锡文,胡炼,等. DGPS 模块动态定位精度测试与分析[J].华南农业大学学报,2010,31(1):102~107.  
Zhang Zhigang, Luo Xiwen, Hu Lian, et al. Study on dynamic positioning precision of 4 kinds DGPS modules [J]. Journal of South China Agricultural University, 2010,31(1):102~107. (in Chinese)