doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.005

小麦条锈病菌夏孢子显微图像远程采集系统设计与试验

雷　雨[1,2]　姚志凤[1,3]　何东健[1,2]

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100;
2. 农业农村部农业物联网重点实验室, 陕西杨凌 712100;
3. 陕西省农业信息感知与智能服务重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 利用孢子捕捉器捕捉小麦田间空气中的条锈病菌夏孢子已成为当前小麦条锈病预测预报的重要手段。针对现有的孢子捕捉设备效率低、费时费力、需人工定时换取载玻片或捕捉带等问题,基于 ARK-1123C 型嵌入式工控机和显微镜 CCD 数字摄像头,提出了一种高放大倍数、高分辨率的小麦条锈病菌夏孢子显微图像远程采集系统的设计方案。设计了系统的硬、软件结构,实现了自动取载玻片、涂脂、空中孢子捕捉、孢子显微图像采集、载玻片回收等一系列功能,且可根据用户需求远程设置孢子捕捉和显微图像采集参数,采集的图像通过无线网络传输到远程服务器中。为了验证系统的性能,在小麦田间进行了 40 d 的系统综合试验测试。测试结果表明,系统可长时间稳定工作,能够远程实时采集放大 400 倍的 4 096 像素×3 288 像素的夏孢子显微图像。该系统能够实时采集和远程传输小麦条锈病菌夏孢子显微图像,可满足野外小麦田间空气中夏孢子监测的需求,为农田空气中小麦条锈病菌夏孢子的自动计数及条锈病的预测预报提供重要技术支持。

关键词: 小麦条锈病; 夏孢子; 显微图像; 远程采集系统

中图分类号: S435.121.4+2; TP23　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2018)11-0039-09

Design and Experiment of Micro-image Remote Acquisition System of Urediniospores of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*

LEI Yu[1,2]　YAO Zhifeng[1,3]　HE Dongjian[1,2]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Internet of Things*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
3. *Shaanxi Key Laboratory of Agricultural Information Perception and Intelligent Service*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Collecting airborne urediniospores of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* (*Pst*) in wheat fields using spore trap devices has currently become an important approach for devising strategies early and effectively controlling wheat stripe rust. However, the existing spore trap devices have some shortcomings, such as low efficiency, time-consuming and requiring manual replacement of slides or plastic tapes. To this end, a high-magnification and high-resolution micro-image remote acquisition system of urediniospores of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* was designed and manufactured based on ARK-1123C embedded industrial computer and microscope CCD digital camera. The hardware and software architectures of the micro-image remote acquisition system were designed, which realized a series of functions, including automatic supply of slide, coating a thin film of petroleum jelly, aerial urediniospore capture, urediniospore micro-image acquisition, and slide recycling. Besides, the parameters of urediniospore capture and micro-image acquisition could be set remotely according to user's requirement, and the collected images could be transmitted to the remote server by 4G wireless network. In order to verify the performance of the system, the system was deployed and tested in a wheat field for 40 d. Experimental results showed that the system worked stably for a long time, which could capture the micro-images of urediniospores, with 400 times magnification and 4 096 pixels×3 288 pixels resolution. The experiments validated that the proposed remote acquisition system can automatically collect and remotely transmit the microscopic image of urediniospores in real time, which provided

收稿日期: 2018-07-23　修回日期: 2018-10-10

基金项目: 陕西省重点产业链项目(2015KTZDNY01-06)和陕西省科技攻关项目(2017NY-104)

作者简介: 雷雨(1990—),男,博士生,主要从事农业电子与自动化技术研究,E-mail: ly759059219@163.com

通信作者: 何东健(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事智能检测与农业信息技术研究,E-mail: hdj168@nwsuaf.edu.cn

important technical support for the automatic counting of the airborne uredinispores and the prediction of the wheat stripe rust in the field. It can also provide a reference for monitoring other airborne fungal spores.

Key words: wheat stripe rust; urediniospores; micro-image; remote acquisition system

0 引言

由条形柄锈菌(*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*, *Pst*)引起的小麦条锈病是中国西北、西南、华北和淮北等冬麦区和西北春麦区小麦的重要病害,一般流行年份可致小麦减产 10% ~20%,特大流行年份可致小麦减产 50% ~60%,对中国粮食安全生产构成重大威胁[1-3]。小麦条锈病是一种气传性多循环真菌病害,影响小麦条锈病发病和传播的因素有很多,除了受实时生境、地形地貌、历史生境等因素的影响外,夏孢子菌源数是影响其发生和流行的主要原因。夏孢子是小麦条锈病发生和发展的侵染源,主要借助气流传播完成周年侵染循环[4-6]。因此,小麦田间空气中病原菌夏孢子的数量和小麦病害发生有着极为密切的关系,对田间空气中夏孢子进行及时准确地捕捉和计数,可为小麦条锈病的预测预报提供基础数据,对降低小麦因条锈病而造成的损失具有重要意义。

目前,空气中气传植物病源真菌孢子多采用孢子捕捉器取样和监测[7-10],捕捉结束后将黏附有孢子的载玻片或捕捉带拿回实验室,在显微镜下人工计数[11-12]或分子生物学方法计数[13-14]等。利用孢子捕捉器捕捉孢子时有两种方法[12,15],但布放在野外田间的孢子捕捉器测点分散、数量多且地理位置偏僻,人工定时换取载玻片或捕捉带工作量大、效率低、费时费力,无法对农田中孢子的浓度进行自动、实时、大尺度监测,导致难以把握大尺度农田真菌孢子的实时和动态变化情况[12,16]。植保专家急需一种能自动捕捉和远程实时统计捕捉结果的解决方案,以节约人力,提高监测效率,并为小麦条锈病的预测预报提供数据支撑。

近年来,随着自动化技术、传感技术、无线网络技术的发展和深入应用,现代农业生产中广泛应用图像采集系统。农业图像采集系统能提供生产现场实时准确的视频图像数据,采集的图像信息在监测病虫害[17-18]、农作物生长[19-20]、农产品检测[21]等方面发挥着重要的作用。然而,目前国内外图像传感器一般由嵌入式 CPU 搭载普通的 CMOS 摄像头或 CCD 摄像头组成,仅适用于视觉可见的对象,无法获取微米级的真菌孢子图像。夏旭阳[22]基于 LabVIEW 平台设计了一种田间远程真菌孢子显微图像采集处理系统,实现了对空气中真菌孢子的快速检测,但需要人工对载玻片涂抹凡士林,且仅能采集载玻片上一个位置点的显微图像,难以反映真菌孢子的真实数量。因此,开发一款对田间空气中小麦条锈病菌夏孢子进行在线自动捕捉和显微成像并远程传输的装备具有重要意义。

结合自动化、显微成像和无线网络技术,基于 ARK-1123C 型嵌入式工控机和显微镜 CCD 数字摄像头,本文自主设计开发的高放大倍数、高分辨率的小麦条锈病菌夏孢子捕捉、显微图像采集及远程传输系统,可为农田空气中小麦条锈病菌夏孢子的自动计数及条锈病的预测预报提供技术支持。

1 系统总体方案设计

1.1 田间监测需求分析

根据田间空气中小麦条锈病菌夏孢子监测应用需求,小麦条锈病菌夏孢子显微图像远程采集系统应满足如下要求:

(1)系统能自动完成取载玻片、涂脂、空气中孢子捕捉、显微图像采集、载玻片回收等功能,实现全自动化监测。

(2)可根据用户需求远程、实时设置孢子捕捉时间和时长、显微图像采样点范围和数量,同时采集的图像能无线传输到远程服务器中。

(3)系统能长时间在野外田间采集夏孢子显微图像,对空气中的夏孢子进行持续监测。

1.2 系统硬件结构

夏孢子显微图像远程采集系统主要包括处理器模块、夏孢子捕捉及显微图像采集模块、无线通信模块、太阳能供电模块 4 部分,系统硬件结构如图 1a 所示。

(1)处理器模块

该模块为系统的控制核心,完成系统各模块的控制任务。

(2)夏孢子捕捉及显微图像采集模块

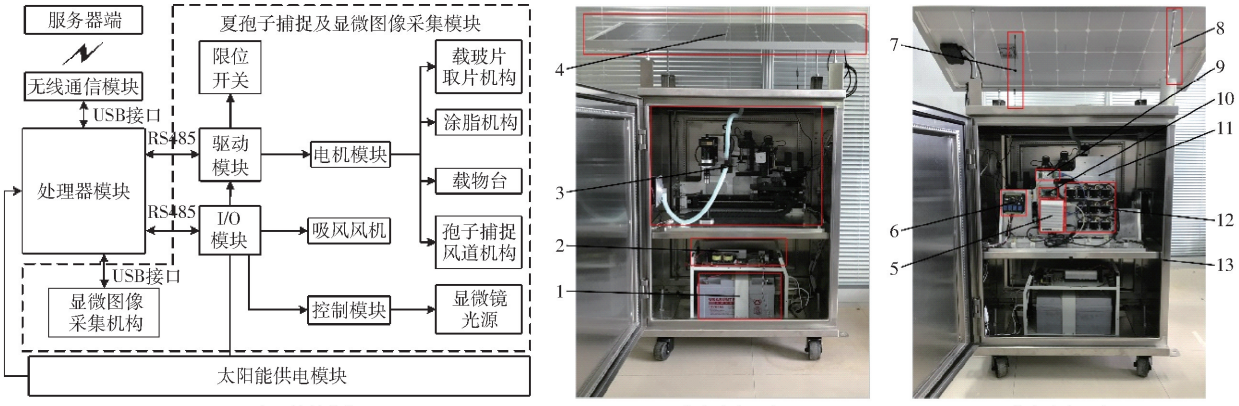
驱动模块和 I/O 模块通过 RS485 通信总线与处理器相连实现控制信号的传输。驱动模块通过 PWM 信号调节驱动芯片输出不同的脉冲数,从而实现各电机的转动以控制相应机构,限位开关对各电机起行程限位保护作用。I/O 模块与吸风风机和控制模块相连接,控制模块通过不同占空比的 PWM 信号调节输出电流,实现对显微镜光源发光强度的稳定定量调节。显微图像采集机构中的显微镜数字摄像头通过 USB 接口连接处理器,以采集夏孢子显微图像。

(3)无线通信模块

负责传输显微图像到远程服务器中,用户可通过服务器获取实时或历史图像数据。

(4)太阳能供电模块

该模块为系统各模块提供电源。太阳能电池板安装于装备顶部,通过全牙通丝螺杆可调节其倾斜角度,以提高对太阳能的吸收效率。远程采集系统各模块和线路安装于钢制的箱体内,工作时关闭嵌有密封封条的前后侧门,可防水和防尘。本文设计的系统实物正视图和后视图如图 1b、1c 所示。



(a) 系统硬件结构框图　　(b) 装备实物正视图　　(c) 装备实物后视图

图 1　系统硬件结构及实物图

Fig. 1　Hareware architecture and picture of system

1. 蓄电池　2. 充放电控制器　3. 夏孢子捕捉及显微图像采集模块　4. 太阳能板　5. 处理器　6. I/O 模块　7. 高增益磁盘天线　8. 全牙通丝螺杆　9. 无线通信模块　10. 光源控制模块　11. 支撑板　12. 电机驱动器模块　13. 箱体

2　系统硬件与软件设计

2.1　系统硬件设计

2.1.1　处理器模块

由于系统需要执行步进电机、吸风风机、显微镜光源等控制,以及显微图像采集和远程控制等多任务调度,故需要有较高性能的处理器作为控制核心。考虑到 ARK－1123C 型嵌入式工控机(研华科技有限公司)采用掌上型无风扇嵌入式系统设计,体积小(133.8 mm×43.1 mm×94.2 mm)、功耗低,适于野外长期工作,因此选用该工控机。其处理器为 Inter Atom E3825,主频 1.33 GHz,内存容量 4 GB,硬盘容量 500 GB,输入电压为 12 V。ARK－1123C 型的 VGA 接口可连接显示器,3 个 USB 接口可用于连接 4G 无线通信模块和显微镜 CCD 数字摄像头,2 个COM 通信端口,可用于 RS485 总线连接电机驱动模块和 I/O 模块。

2.1.2　夏孢子捕捉及显微图像采集模块

夏孢子捕捉及显微图像采集模块的功能是在嵌入式工控机的控制下,自动完成取载玻片、涂脂、孢子捕捉、显微图像采集、回收载玻片等一系列操作任务。根据夏孢子自动捕捉和显微图像采集要求,本文设计了夏孢子捕捉及显微图像采集模块,其组成如图 2 所示。

夏孢子捕捉及显微图像采集模块主要包括载玻片取片机构、涂脂机构、孢子捕捉风道机构、显微图像采集机构、吸风风机、软管、显微镜光源、直线导轨

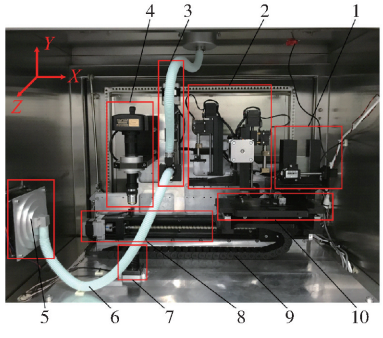


图 2　夏孢子捕捉及显微图像采集模块实物图

Fig. 2　Physical map of urediniospore capture and micro-image acquisiton module

1. 载玻片取片机构　2. 涂脂机构　3. 孢子捕捉风道机构　4. 显微图像采集机构　5. 吸风风机　6. 软管　7. 显微镜光源　8. 直线导轨滑台模组　9. 尼龙拖链　10. 载物台

滑台模组、尼龙拖链和载物台等部分。直线导轨滑台模组由 THK SKR33 导轨、滑台与步进电机 A 组成,用螺栓水平固定于支撑板下部,步进电机 A 的参数选型如表 1 所示。载物台与滑台通过螺栓连接固定,可在直线导轨滑台的带动下水平方向上运行;显微图像采集机构通过螺栓竖直安装于支撑板上,显微镜光源竖直固定于显微图像采集机构正下方,保证光源中心与物镜铅直对齐。

步进电机驱动模块采用 VSMD102－025T 驱动器(北京韦恩斯技术有限公司),通过 PWM 信号调节驱动芯片输出不同的脉冲数,从而实现各步进电机(表 1)的转动以控制各机构完成任务。显微镜光源采用 12 V/3 W 的 PL－2108－3W 点光源(东莞市

沃德普自动化科技有限公司),光源控制模块采用输出电流可调节的 PT4115 芯片,从而实现显微镜光源发光强度的稳定定量调节以提高显微图像的清晰度。

表 1 步进电机参数选型

Tab. 1 Parameter selection of stepper motors

电机	型号	步距角/(°)
步进电机 A	42HS40 - 1704A05 - 005	1.8
丝杆步进电机 B	17HD40007H - 120N	1.8
丝杆步进电机 C	OK20STH30 - 0604A - 100ST52	1.8
丝杆步进电机 D	17HD40007H - 120N	1.8
丝杆步进电机 E	VSM1040	1.8
丝杆步进电机 F	17HD4001 - 120N	1.8
步进电机 G	42BYGH4812AA	1.8
步进电机 H	42BYGH4812AA	1.8
步进电机 I	42HS40 - 1704A05 - 005	1.8
步进电机 J	42HS40 - 1704A05 - 005	1.8

该模块中,载玻片取片机构、载物台、涂脂机构、孢子捕捉风道机构和显微图像采集机构等设计如下:

(1)载玻片取片机构

载玻片取片机构的功能是从载玻片片盒中自动取出 1 片载玻片放置在载物台上的玻片槽内,其组成如图 3 所示。

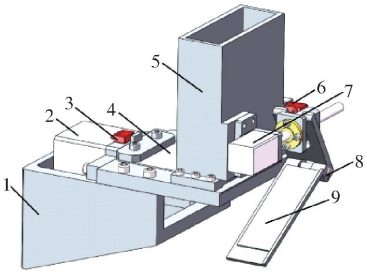


图 3 载玻片取片机构示意图

Fig. 3 Schematic of mechanism for supply of slide

1. 支架座 2. 丝杆步进电机 B 3、6. 行程限位开关 4. 推片板 5. 片盒 7. 丝杆步进电机 C 8. 滑片板 9. 载玻片

载玻片取片机构主要包括支架座、丝杆步进电机 B、推片板、片盒、丝杆步进电机 C、滑片板、载玻片和行程限位开关等部分,步进电机的参数选型如表 1 所示。片盒内最大可存放 100 片载玻片,片盒底部采用悬空设计,悬空部分的尺寸为 77 mm × 1.5 mm,比载玻片尺寸略大,便于推出载玻片。行程限位开关安装于丝杆末端,保证步进电机的起始与结束位置固定不变。当需要取片时,丝杆步进电机 B 带动推片板向前运动,作用于片盒的悬空位置,推动位于片盒内最底层的载玻片向前移动到滑片板上,丝杆步进电机 C 带动滑片板倾斜使载玻片滑到载物台上的玻片槽中,完成取片任务。

(2)载物台

为了能采集载玻片上不同位置点的夏孢子显微图像,载物台中载玻片槽内的载玻片应能实现平面运动,以完成后续的涂脂、图像采集等操作任务。因此,载物台采用自动化设计,其组成如图 4 所示。

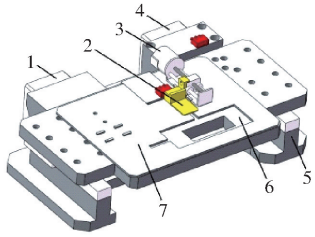


图 4 载物台示意图

Fig. 4 Schematic of automatic stage

1. 丝杆步进电机 D 2. 限位销 3. 丝杆步进电机 E 4. 丝杆步进电机 F 5. 基座 6. 载玻片槽 7. 载玻片限位板

载物台主要包括丝杆步进电机 D、限位销、丝杆步进电机 E、丝杆步进电机 F、基座、载玻片槽和载玻片限位板等部分,步进电机的参数选型如表 1 所示。载物台安装于直线导轨滑台(图 2)上,可在直线导轨滑台的带动下沿 X 方向左右运动,丝杆步进电机 F 能实现载物台沿 Z 方向前后运动,以控制载物台在平面上运动。

载玻片限位板上的载玻片槽尺寸为 78 mm × 28 mm,用于放置载玻片。丝杆步进电机 E 通过螺丝与限位销连接,在涂抹凡士林时,丝杆步进电机 E 推动限位销卡住载玻片,防止载玻片被涂胶头黏住带走;在显微图像采集结束后,丝杆步进电机 D 驱动载玻片限位板,推动载玻片向前移动使其落入回收盒内回收。

(3)涂脂机构

涂脂机构的功能是利用步进电机控制涂胶头和刮刀片将凡士林均匀涂抹于载物台上的载玻片的上表面,其组成如图 5 所示。

涂脂机构主要包括涂胶头、胶盒、支架板、十字丝杆导轨滑台、步进电机 G、步进电机 H、丝杆导轨滑台、步进电机 I 与刮刀片等部分,步进电机的参数选型如表 1 所示。凡士林存放于胶盒中,当需要涂抹时,步进电机 I 驱动涂胶头向 Z 轴反向运动到胶盒正上方,接着步进电机 G 驱动涂胶头向下运动,从胶盒中蘸取适量的凡士林,然后两个步进电机将涂胶头依次复位到初始位置,步进电机 G 驱动涂胶头向下运动将凡士林涂抹于载玻片上。然后载物台向 X 轴正向移动到刮刀片下方,通过步进电机 H 驱动刮刀片向下紧贴住载玻片,载物台再向

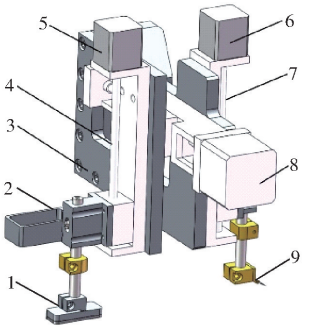


图 5　涂脂机构示意图

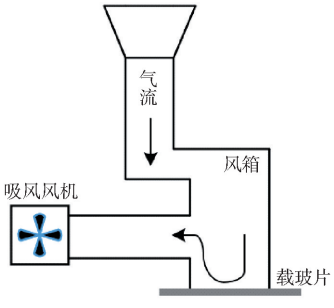
Fig. 5　Schematic of vaseline application mechanism

1. 涂胶头　2. 胶盒　3. 支架板　4. 十字丝杆导轨滑台　5. 步进电机 G　6. 步进电机 H　7. 丝杆导轨滑台　8. 步进电机 I　9. 刮刀片

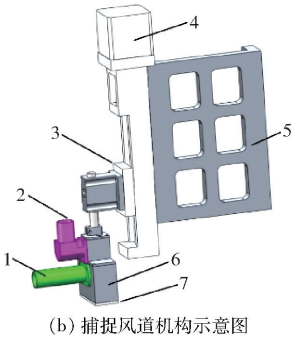
X 轴正向移动，刮刀片自动刮走多余的凡士林，使载玻片上均匀涂抹一薄层凡士林，用于黏附空气中的夏孢子。

(4)孢子捕捉风道机构

孢子捕捉原理如图 6a 所示，当开始捕捉夏孢子时，吸风风机启动开始吸风，风道内形成负压，夹杂着夏孢子的外部空气从箱体进风口吸入风箱内，空气中的夏孢子与载玻片发生碰撞并黏附其上，空气则从箱体出风口排出。基于此原理，设计的孢子捕捉风道机构如图 6b 所示。



(a) 捕捉原理示意图



(b) 捕捉风道机构示意图

图 6　孢子捕捉风道机构图

Fig. 6　Schematic of spores collecting airway mechanism

1. 风箱出风口　2. 风箱进风口　3. 丝杆导轨滑台　4. 步进电机 J　5. 连接板　6. 风箱　7. 载玻片

孢子捕捉风道机构主要包括风箱出风口、风箱进风口、丝杆导轨滑台、步进电机 J、连接板、风箱和载玻片等部分。连接板与主支撑板用螺栓固定连接。无底风箱的进风口通过软管与箱体进风口相连，风箱出风口通过软管与吸风风机相连，驱动步进电机 J 能够使丝杆导轨滑台带动风箱下降，使风箱底部与移动到其下方载物台上的载玻片贴紧，使外部气流与内部隔绝，避免外部空气污染内部硬件。吸风风机选用 5.16 W/1.2V 的 3610KL－04W－B50 型专用风扇(日本美蓓亚公司)，转速为 3 200 r/min，气体采集流量为 1 550 L/min。

(5)显微图像采集机构

由文献[23]可知，夏孢子外观为橙黄色，外形似椭圆，平均尺寸为 24.5 μm×21.6 μm。在实验室用研究级显微镜对夏孢子观察可知，需光学放大 200 倍以上才能视觉可见。结合现有显微成像技术，设计的显微图像采集机构如图 7 所示。

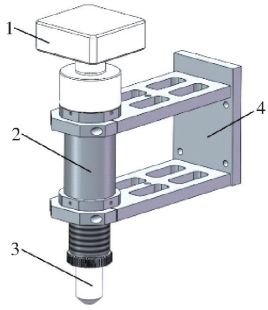


图 7　显微图像采集机构示意图

Fig. 7　Schematic of micro-image acquisition mechanism

1. 显微数字摄像头　2. 镜筒　3. 物镜　4. 连接板

显微图像采集机构主要包括显微数字摄像头、镜筒、物镜和连接板。连接板与主支撑板用螺栓固定连接。显微数字摄像头选用 UCMOS 14000KPA Pro 系列高分辨率显微镜 CCD 数字摄像头(杭州图谱光电科技有限公司)，分辨率可达 1 400 万像素，JPEG 格式；镜筒选用 1 倍镜筒；物镜选用 20 倍远心物镜。显微图像采集机构可采集电子放大 400 倍的 1 400 万像素的夏孢子显微图像。

2.1.3　无线通信模块

考虑到 4G 技术的广泛应用，且传输速率可达 50 Mb/s，适于快速、远距离无线传输高质量音视频图像。故用华为 ME909s－821 型 4G 无线模块和高增益磁盘天线，以实现服务器端对孢子显微图像远程采集系统的远程控制和图像数据的远程传输。考虑到 TeamViewer 远程控制应用软件(TeamViewer GmbH 公司，德国)具有桌面共享和数据传输简单的特点，只需在服务器端和客户端同时运行 TeamViewer，该软件第 1 次在两端运行便会自动生成伙伴 ID，以后只需在服务器端输入密码即可立即建立起连接，故用 TeamViewer 实现对采集系统的远程控制和数据无线传输。

2.1.4 太阳能供电模块

为提供系统在野外小麦田间长时间持续工作的电源,设计了太阳能供电模块,其由太阳能电池板、可充电蓄电池和充放电控制器组成。太阳能电池板选用单晶硅太阳能电池板,功率为 100 W、电池片转换效率为 18%、最大输出电压为 18.2 V、最大输出电流为 5.49 A、尺寸为 1 200 mm×540 mm×30 mm。充放电控制器控制整个供电模块的工作状态,对蓄电池提供充放电管理、状态监测、防过充放电和防反流。可充电蓄电池选择 12 V、65 A·h 的阀控密封式铅酸蓄电池,在太阳能供电不足的情况下维持系统的正常工作。

2.2 系统软件设计

为实现载玻片的自动供片、涂脂、空气中孢子捕捉、显微图像采集和回收载玻片等任务操作,以嵌入式 Windows 7 为操作系统,Microsoft Visual Studio 2013 和 QT5.5.1 图形用户界面库为开发平台,移植相关的驱动、中间件,开发夏孢子显微图像采集软件,实现对系统中各个模块的运行控制。

2.2.1 系统工作流程

系统上电开机后进行初始化,打开软件设置参数,点击启动按钮开始运行。系统主要工作流程如图 8 所示。

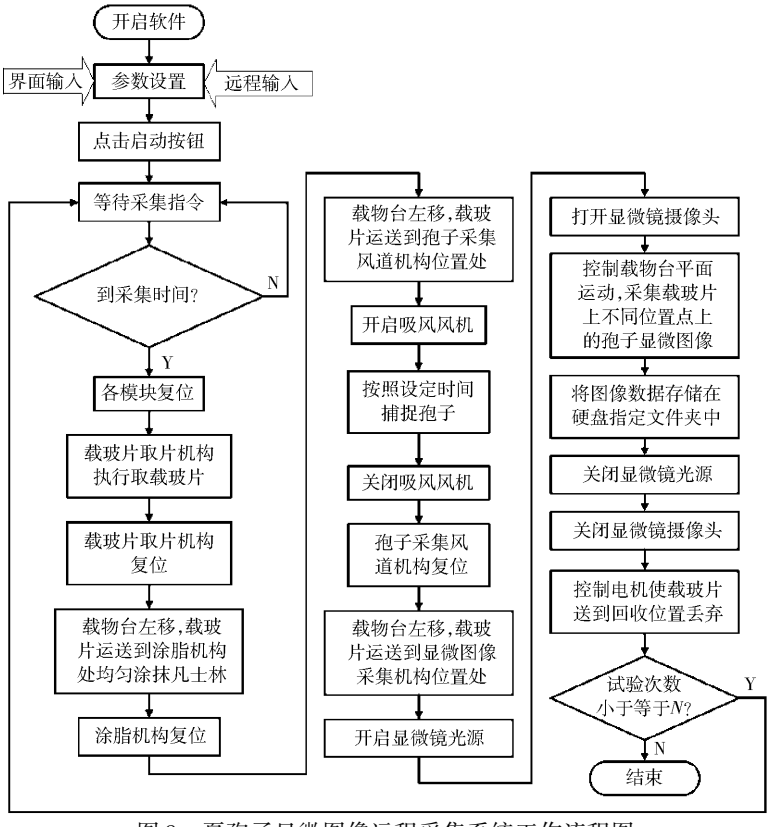


图 8 夏孢子显微图像远程采集系统工作流程图

Fig. 8 Flow chart of micro-image remote acquisition system for urediniospores

2.2.2 显微图像采集与传输

用 7101 型全透明载玻片作为孢子捕捉载体,尺寸为 75.6 mm×25.4 mm×1 mm。由于在高放大倍数下,遍历载玻片上所有区域采集显微图像费时且图像数据量庞大,故借鉴文献[24]中的十二个横向遍历法采集显微图像。基于十二个横向遍历法,设计的不同位置点显微图像自动采集顺序示意如图 9 所示。

在载玻片中间 50 cm×25 cm 区域采集显微图像,换算成步进电机的脉冲数为 20 000×10 000。左下角圆点为采集起点,右上角圆点为终点,通过驱动模块输出不同的脉冲数,控制步进电机的转动以实现载物台精准的平面移动,以采集载玻片上不同坐标点的夏孢子显微图像。采集点之间的脉冲数间距 (x,z) 可根据用户需求设定,若设定 X、Z 轴脉冲数间距分别为 5 000,从起点开始采集第 1 幅图像,按照箭头方向依次采集圆点处的图像,到终点完成图

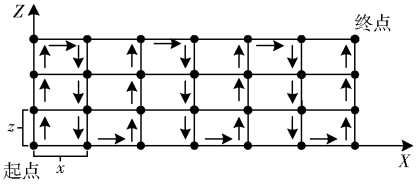


图 9 载玻片不同位置点显微图像自动采集示意图

Fig. 9 Schematic of automatic acquisition of micro-images from different positons of slide

像采集，共采集 12 幅。图像采集完成后，以 JPEG 格式保存在硬盘指定文件中，最后用 TeamViewer 远程控制应用软件将图像数据通过 4G 无线网络传输到服务器端。

2.2.3　系统应用软件

为有效地执行和控制各模块的运动，采用 Microsoft Visual Studio 2013 和 QT5.5.1 平台开发了小麦条锈病菌夏孢子显微图像远程采集程序软件，应用层采用模块化设计，实现对系统中各个模块的运行控制。夏孢子显微图像远程采集程序功能主要包括显微图像显示、自动控制、手动控制、电源控制、显微图像采集参数、显微镜数字摄像头参数、执行状态、图像保存路径和急停 9 部分。通过自动控制可设置采集次数和采集时间，实现对小麦田间空中夏孢子的定时监测；手动控制和电源控制能手动对各模块进行启停以检查各部分是否正常工作；显微图像采集参数包括 (x,z) 脉冲数扫描间距、风机吸风时间和显微镜光源预热时间，可根据采集要求设置其参数值；显微镜数字摄像头参数包括对比度、增益、色度、曝光时间、色温和饱和度，通过调节摄像头参数可使显微图像的质量最佳；在程序运行时，通过执行状态栏可观察运行状态；添加图像保存路径，可将显微图像存储到指定文件夹中；最后添加急停按钮，当程序运行出现故障时用来关闭程序。图 10 为夏孢子显微图像远程采集软件界面。

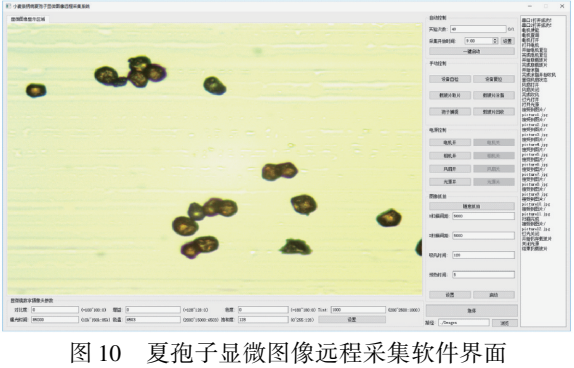


图 10　夏孢子显微图像远程采集软件界面

Fig. 10　Software interface of urediniospore micro-image remote acquisition

3　试验结果与分析

3.1　试验环境搭建及仪器布置

为了验证本仪器能否长时间稳定地远程采集高倍数、高分辨率的夏孢子显微图像，进行了显微图像采集试验。

参照文献[3]，供试小麦材料选用易感病品种小堰 22，经浸种、催芽后，于 2017 年 10 月 12 日播种于西北农林科技大学小麦人工病圃农田中，播种面积为 1 000 m^2。待小麦长到拔节期，用 0.02% 吐温-80 溶液，将实验室繁育的新鲜小麦条锈病菌夏孢子配制成质量浓度为 0.125 mg/mL 的孢子悬浮液，于 2018 年 4 月 5 日傍晚给小麦接种。接种后用经水喷雾处理的塑料薄膜覆盖 12 h，以保持饱和湿度，次日 08:30 揭去塑料薄膜，以促其发病。

2018 年 4 月 20 日，小麦条锈病开始大规模发病，于当天开始在农田中进行为期 40 d 的综合测试试验，直到冬小麦成熟期初期结束，仪器在小麦田间布放情况如图 11 所示。



图 11　仪器布放图

Fig. 11　Device deployment diagram

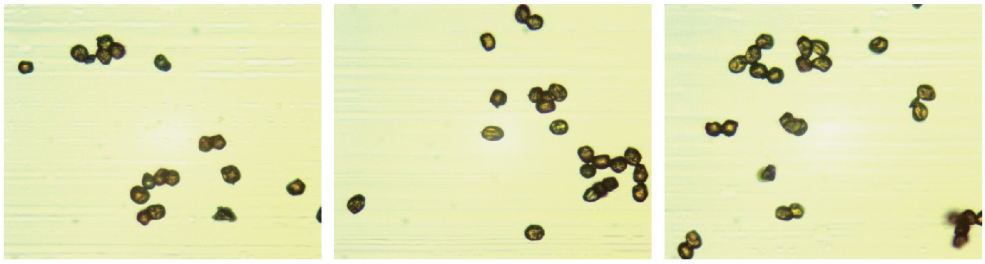
3.2　系统软件运行测试

为了测试系统运行稳定性，在服务器端运行 TeamViewer 软件实现对系统的远程控制，进而对系统参数进行设置：采集开始时间设置为 09:00，孢子捕捉时长为 2 h，每天采集 1 次，共采集 40 次，X 轴和 Z 轴脉冲数扫描间距均为 5 000，光源预热时间为 5 min，摄像头曝光时间为 85 000 μs，色温为 6 503 K，饱和度为 128，其他摄像头参数采用默认值。参数设置完后，软件一键启动自动运行捕捉空中夏孢子和采集显微图像，并且保存至系统本地硬盘，或将图像无线传输至服务器。执行 40 次采集任务总共采集了 480 幅显微图像，放大倍数为 400 倍，分辨率为 4 096 像素 ×3 288 像素，JPEG 格式，单幅图像大小为 601 KB。

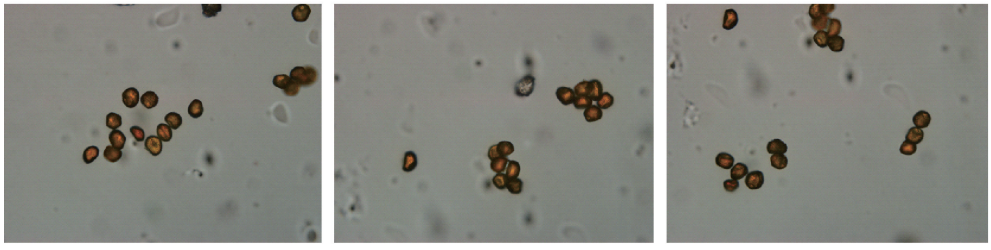
3.3　图像对比与分析

为了对比系统采集的夏孢子显微图像的质量，将系统采集的图像与研究级显微镜采集的图像进行对比。用研究级倒置显微镜（BX52 型，Olympus，日本）和数码成像系统（DP72 型，Olympus，日本）对夏孢子临时载玻片进行观察、拍照，共获得 50 幅夏孢子图像，放大倍数为 400 倍，分辨率为 4 140 像素 ×3 096 像素，JPEG 格式，单幅图像大小为 798 KB。图 12 为系统采集图像与研究级显微镜采集图像的对比。

从图 12a 可以看出，系统能够采集放大 400 倍的 4 096 像素 ×3 288 像素的夏孢子显微图像；夏孢子外观呈橙黄色，外形似椭圆，清晰度较高；夏孢子相互粘连现象较多，由于夏孢子是立体结构，当夏孢



(a) 本文方法采集的夏孢子显微图像



(b) 研究级显微镜采集的夏孢子显微图像

图 12 小麦条锈病菌夏孢子显微图像对比

Fig. 12 Micro-images comparison of urediniospores of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*

子出现部分重叠时,由于放大倍数大,景深小,重叠在上部的孢子无法聚焦,少量孢子会变模糊;图像背景呈淡黄色,由于载玻片上涂抹了一薄层凡士林,显微放大后背景中存在晶体条状凡士林。

图 12b 中研究级显微镜采集的夏孢子显微图像的夏孢子边界轮廓都比较清晰,直观上颜色有一定差异,主要原因是研究级显微镜所采用的数码成像系统制造更加精密、昂贵。虽然本文方法采集的图像背景颜色和研究级显微镜采集的相比有一定差距,但不影响夏孢子的识别和计数,所采集的显微图像可满足夏孢子监测的要求[25]。

3.4 能量可用性测试

在野外小麦田间对系统进行了为期 40 d 的能量可用性测试。蓄电池容量为 65 A·h,额定电压为 12 V,实际电压为 10.8 ~ 13.7 V,在充放电控制器的作用下,低于 10.8 V 时停止放电,高于13.7 V时停止充电。太阳能电池板在光照充足的晴天经过 8 h 左右,即可将蓄电池从 10.8 V 充到 13.7 V,在连续 7 d 以上的阴雨天气时蓄电池电压的最低值为 10.8 V。在 40 d 的连续测试中,系统可以有效地工作,仅在连续 7 d 以上阴雨天气、光照严重不足、太阳能供电不足的情况下系统出现过 1 次断电而停止工作,为保证连续 40 d 的显微图像采集,采用更换备用蓄电池保持系统继续工作。

4 结论

(1)针对目前使用的孢子捕捉设备存在的不足,基于 ARK - 1123C 型嵌入式工控机和显微镜 CCD 数字摄像头,提出了一种高放大倍数、高分辨率的小麦条锈病菌夏孢子显微图像远程采集系统的设计方案,系统能够实现小麦田间空气中夏孢子的持续监测。

(2)设计了由载玻片取片机构、载物台、涂脂机构、孢子捕捉风道、显微图像采集机构组成的夏孢子捕捉及显微图像采集模块、无线通信模块和太阳能供电模块等硬件,以及主控端夏孢子显微图像采集软件,可自动完成取载玻片、涂脂、空中孢子捕捉、孢子显微图像采集、载玻片回收等功能,且可根据用户需求远程设置孢子捕捉和显微图像采集参数,采集的图像通过无线网络传输到远程服务器中。

(3)田间试验表明,系统可自动完成夏孢子捕捉和显微图像采集,能够远程实时采集放大 400 倍的 4 096 像素 ×3 288 像素的夏孢子显微图像,可满足小麦田间夏孢子监测的要求。系统能长时间稳定工作,可为农田空气中小麦条锈病菌夏孢子的自动计数及条锈病的预测预报提供重要的技术支持,也可为其他气传性真菌孢子的自动监测提供借鉴思路。

参 考 文 献

1 李振岐,曾士迈. 中国小麦锈病[M]. 北京:中国农业出版社, 2002.

2 WAN A M, ZHAO Z H, CHEN X M, et al. Wheat stripe rust epidemic and virulence of *Puccinia striiformis* f. sp *tritici* in China in 2002[J]. Plant Disease, 2004, 88(8): 896 - 904.

3 雷雨,韩德俊,曾庆东,等. 基于高光谱成像技术的小麦条锈病病害程度分级方法[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(5): 226 - 232. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180526&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.026.

LEI Yu, HAN Dejun, ZENG Qingdong, et al. Grading method of disease severity of wheat stripe rust based on hyperspectral imaging technology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 226 – 232. (in Chinese)

4 ZENG S M, LUO Y. Long-distance spread and interregional epidemics of wheat stripe rust in China[J]. Plant Disease, 2006, 90(8): 980 – 988.

5 王海光,杨小冰,马占鸿. 基于 HYSPLIT – 4 模式的小麦条锈病菌远程传播研究[J]. 中国农业大学学报,2010,15(5):55 – 64.
WANG Haiguang, YANG Xiaobing, MA Zhanhong. Investigation of the long-diatance transports of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* in China using HYSPLIT – 4 model[J]. Journal of China Agricultural University, 2010, 15(5): 55 – 64. (in Chinese)

6 WANG H, YANG X B, MA Z. Long-distance spore transport of wheat stripe rust pathogen from Sichuan, Yunnan, and Guizhou in Southwestern China[J]. Plant Disease, 2010, 94(7): 873 – 880.

7 PRADOS-LIGERO A M, MELERO-VARA J M, CORPAS-HERVIAS C, et al. Relationships between weather variables, airborne spore concentrations and severity of leaf blight of garlic caused by *Stemphylium vesicarium* in Spain[J]. European Journal of Plant Pathology, 2003, 109(4): 301 – 310.

8 ISARD S A, BARNES C W, HAMBLETON S, et al. Predicting soybean rust incursions into the North American Continental Interior using crop monitoring, spore trapping, and aerobiological modeling[J]. Plant Disease, 2011, 95(11): 1346 – 1357.

9 曹学仁,周益林. 植物病害监测预警新技术研究进展[J]. 植物保护,2016,42(3):1 – 7.
CAO Xueren, ZHOU Yilin. Progress in monitoring and forecasting of plant diseases[J]. Plant Protection, 2016, 42(3): 1 – 7. (in Chinese)

10 CHOUDHURY R A, KOIKE S T, FOX A D, et al. Season-long dynamics of spinach downy mildew determined by spore trapping and disease incidence[J]. Phytopathology, 2016, 106(11): 1311 – 1318.

11 CHEN X, PENMAN L, WAN A, et al. Virulence races of *Puccinia striiformis* f. sp *tritici* in 2006 and 2007 and development of wheat stripe rust and distributions, dynamics, and evolutionary relationships of races from 2000 to 2007 in the United States[J]. Canadian Journal of Pathology, 2010, 32(3): 315 – 333.

12 宋晶晶,曹远银,李天亚,等. 小麦白粉病菌空中孢子量与气象因子的关系及病害预测模型的建立[J]. 湖北农业科学,2011,50(13):2652 – 2654.
SONG Jingjing, CAO Yuanyin, LI Tianya, el al. Relationship between the amount of aerial conidia of *Blumeria graminis* f. sp. tritici and meteorological factors and the establishment of forecasting model[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2011, 50(13): 2652 – 2654. (in Chinese)

13 KAROLEWSKI Z, KACZMAREK J, JEDRYCZKA M, et al. Detection and quantification of airborne inoculum of *Pyrenopeziza brassicae* in Polish and UK winter oilseed rape crops by real-time PCR assays[J]. Grana, 2012, 51(4): 270 – 279.

14 曹学仁. 小麦白粉病的遥感监测及捕捉器中孢子的 Real-time PCR 定量检测[D]. 北京:中国农业科学院,2012.
CAO Xueren. Remote sensing for wheat powdery mildew monitoring and quantification of conidia in traps using Real-time PCR [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012. (in Chinese)

15 刘伟,姚冬明,范洁茹,等. 田间空气中小麦白粉菌分生孢子的动态监测研究[J]. 植物病理学报,2016,46(1):112 – 118.
LIU Wei, YAO Dongming, FAN Jieru, et al. Dynamic monitoring of aerial conidia of *Blumeria graminis* f. sp. *tritici* in wheat fields[J]. Acta Phytopathologica Sinica, 2016, 46(1): 112 – 118. (in Chinese)

16 曹学仁,周益林,段霞瑜. 定容式孢子捕捉器在植物病害流行学研究中的应用[C]//中国植物病理学会 2008 年学术年会,2008:500 – 503.

17 肖德琴,叶耀文,冯健昭,等. 适应场景光照变化的桔小实蝇诱捕监测系统优化设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(11):197 – 204.
XIAO Deqin, YE Yaowen, FENG Jianzhao, et al. Optimization design and experiment of monitoring system for *Bactrocera dorsalis* trapping under lighting variations[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(11): 197 – 204. (in Chinese)

18 韩瑞珍,何勇. 基于计算机视觉的大田害虫远程自动识别系统[J]. 农业工程学报,2013,29(3):156 – 162.
HAN Ruizhen, HE Yong. Remote automatic identification system of field pests based on computer vision[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(3): 156 – 162. (in Chinese)

19 殷建军,潘春华,肖克辉,等. 基于无线图像传感器网络的农田远程监测系统[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(7):286 – 293. http://www. j-csam. org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? flag = 1&file_no = 20170736&journal_id = jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2017. 07. 036.
YIN Jianjun, PAN Chunhua, XIAO Kehui, et al. Remote monitoring system for farmland based on wireless image sensor network [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 286 – 293. (in Chinese)

20 殷建军,张铁民,可欣荣,等. 面向田园监测的低成本多光谱图像远程采集节点设计[J]. 农业工程学报,2016,32(13):118 – 124.
YIN Jianjun, ZHANG Tiemin, KE Xinrong, et al. Design of remote acquisition node of low-cost multispectral image for field monitoring[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(13): 118 – 124. (in Chinese)

21 顾宝兴,姬长英,王海青,等. 智能移动水果采摘机器人设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(6):153 – 160. http://www. j-csam. org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? flag = 1&file_no = 20120628&journal_id = jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2012. 06. 028.
GU Baoxing, JI Changying, WANG Haiqing, et al. Design and experiment of intelligent mobile fruit picking robot[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 153 – 160. (in Chinese)

22 夏旭阳. 田间植物真菌孢子显微图像采集处理系统研究[D]. 保定:河北农业大学,2015.

23 CHEN W Q, WELLINGS C, CHEN X M, et al. Wheat stripe (yellow) rust caused by *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*[J]. Molecular Plant Pathology, 2014, 15(5): 433 – 446.

24 STERLING M, ROGERS C, LEVETIN E. An evaluation of two methods used for microscopic analysis of airborne fungal spore concentrations from the Burkard Spore Trap[J]. Aerobiologia, 1999, 15: 9 – 18.

25 LEI Yu, YAO Zhifeng, HE Dongjian. Automatic detection and counting of urediniospores of *Puccinia striiformis* f. sp *tritici* using spore traps and image processing[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 13647.