

基于无线图像传感器网络的农田远程监测系统

殷建军 潘春华 肖克辉 叶耀文 刘小平 肖德琴

(华南农业大学数学与信息学院, 广州 510642)

摘要: 为了实时获取农田图像和视频信息,提出了基于无线图像传感器网络的农田远程监测系统。针对当前图像传感器节点存在的不足,基于 CMOS 图像传感器和 S3C6410 嵌入式处理器设计了低成本、高分辨率的无线图像传感器节点,并研究了基于驱动层和应用层协作的分辨率实时调整算法,使得节点具备 10 种不同的分辨率,最高分辨率可达 500 万像素,而且分辨率可根据用户需求实时调整,以满足用户对不同图像精度的需求。采用 WiFi 技术构建无线图像传感器网络,并通过 4G 网络远程传输图像和视频到服务器。在服务器端开发了基于 Web 的可视化农田信息管理软件,实现对采集的数据进行有效存储、管理和应用,并为用户提供网络服务。部署了该系统并进行了长时间的运行测试试验,试验结果表明:系统可稳定地运行,能够根据远程指令采集并传输不同分辨率的图像,采集并传输 1 幅 126 KB 左右的图像平均耗时为 5.36 s,网络平均丢包率为 1.67%,客户端开启视频监控平均时延为 3.48 s,视频播放流畅。

关键词: 无线图像传感器网络; 分辨率调整算法; 可视化管理软件; 远程监测系统

中图分类号: S24; TP274 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)07-0286-08

Remote Monitoring System for Farmland Based on Wireless Image Sensor Network

YIN Jianjun PAN Chunhua XIAO Kehui YE Yaowen LIU Xiaoping XIAO Deqin
(College of Mathematics and Informatics, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: A remote monitoring system for farmland based on wireless image sensor network was put forward in order to obtain the farmland image and video information in real time. Aiming at the shortcomings of the current image sensor nodes, a low-cost high-resolution wireless image sensor node was designed based on CMOS image sensor chip and S3C6410 embedded processor. To ensure the stability and reliability of the node, the powerful embedded Linux operating system was employed as the software development platform. And based on this platform, a modular designing method was adopted to program the software system of the node in C/C++ language. Especially, a resolution adjustment algorithm based on driver and application layer cooperation was studied, which made the node had 10 different resolutions and the highest resolution was up to 5 mega pixels. More importantly, the resolution can be adjusted in real time according to the requirements of users when it was working, which made the node can meet the needs of users for different image accuracies. A wireless image sensor network was constructed by utilizing WiFi technology as well as the images and videos captured by the nodes were remotely transmitted to the server through the 4G network. In order to prolong the life cycle of the node, a solar power supply system was designed. A visual farmland information management software Web-based was developed in order to effectively store, manage and use the data captured by the nodes, and a convenient method was provided for a user to remotely access the acquisition networks and the data stored in the server. The system was deployed and tested for a long time. The test results showed that the system could work stably, as well as capture and transmit images with different resolutions according to the remote instruction. Moreover, the average time to capture and transmit one image with size of about 126 KB was about 5.36 s, and the average packet loss ratio of the network was about 1.67%. In the

收稿日期: 2016-10-26 修回日期: 2016-12-05
基金项目: 国家星火计划项目(2014GA780064、2015GA780002)和广东省科技计划项目(2015A020224033、2015A020209129)
作者简介: 殷建军(1981—),男,讲师,博士,主要从事无线传感器网络在农业上的应用研究,E-mail: jianjunyin@scau.edu.cn
通信作者: 肖德琴(1970—),女,教授,博士生导师,主要从事无线传感器网络在农业上的应用研究,E-mail: deqinx@scau.edu.cn

tests, the average delay for the client to open video monitoring was about 3.48 s, and the video playing was smooth. Finally, the power supply system based on the solar energy could provide a stable power supply for the nodes in the long work. The tests validated that the remote monitoring system designed in this work can automatically capture images and videos of farmland in real time, transmit them to the server remotely, and satisfy the requirement of users for remote monitoring farmland.

Key words: wireless image sensor network; resolution adjustment algorithm; visual management software; remote monitoring system

引言

农田的图像和视频信息具有直观、便捷、实时和信息量大的优点^[1-2]。农田静态图像可被用来观测农作物的长势和分析农作物各种深度状态信息^[3-5],农田视频监控可用于在线统计农田害虫数量^[6-7],也可用于农田安全生产监控^[8]。无线图像传感器网络(Wireless image sensor network, WISN)由一组微型图像传感器节点以自组网的形式构成^[9-10],能够采集被监测区域内的图像和视频信息,并无线传输到控制中心。

近年来,国内外学者研究了 WISN 在农业监测方面的应用。PAEK 等^[11]开发和部署了 2 个基于图像的环境监测系统,一个用于监测生物学家统计蜥蜴和蟾蜍数量的陷阱,另一个监测系统用来监测鸟巢。THULASIPRIYA 等^[12]开发了一个基于无线图像传感器网络的害虫陷阱监测系统,用于采集陷阱图像并进行图像分析,以统计果蝇数量。LLORET 等^[13]提出了一个带有图像处理系统的 WISN 用于葡萄状态的监测。姚仲敏等^[14]设计了一个基于移动无线传感器网络的农田植株图像监测系统,利用无人机搭载协调器收集节点采集的图像数据。杨信廷等^[15]设计了一种基于无线多媒体传感器网络的作物环境与长势远程监测系统。

上述 WISN 监测系统在实际应用中存在以下不足:①图像采集模块大都是购买市面上的成品摄像头,价格较高。②图像采集模块的分辨率低,且固定不可调,无法满足用户对不同图像精度的需要。③构建的采集网络大都基于 ZigBee 协议,传输速率低、传输延迟大。④在服务器端没有集成可视化信息管理软件,不能实现更完善的节点管理、数据分析和应用服务。

本文基于 CMOS 图像传感器自行研制低成本、高分辨率的图像传感器节点,并以此构建基于 WiFi 的 WISN 用于农田的远程监测,并在服务器端开发可视化信息管理软件,对节点和采集的数据进行管理,并为用户提供数据查询、统计、分析等网络服务功能。

1 材料与方法

1.1 监测系统结构

农田远程监测系统体系结构如图 1 所示。系统在逻辑上可分为 3 部分:①由部署在监测区域内的采集节点所构成的采集子系统,负责采集图像和视频数据。②由汇聚节点(Sink node)、网关节点(Gateway node)和 4G 网络组成的传输子系统,负责将数据传送到服务器。③由服务器和备份服务器及运行其上的可视化信息管理软件组成应用子系统,负责接收、存储、管理和分析数据,并为用户提供可视化网络服务功能。

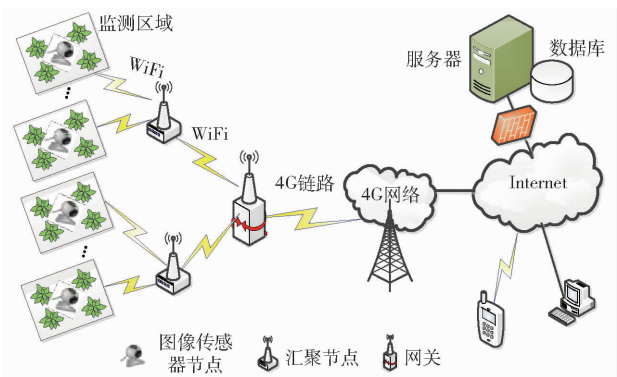


图 1 监测系统体系结构

Fig. 1 Architecture of monitoring system

部署在农田的图像传感器节点周期性地采集农作物和农田环境图像或视频信息,并利用 WiFi 技术无线发送到汇聚节点,再由汇聚节点转发到网关节点;网关节点将接收的数据从 802.11 局域网的数据帧格式转换为 4G 的 TDD-LTE 数据帧格式,然后通过 4G 模块发送到服务器;最后,服务器对数据进行存储、处理和分析。用户可以利用智能手机或计算机通过 Internet 与监测系统进行交互,可以对数据进行查询、统计和分析,也可以根据应用需要修改监测参数等。

1.2 系统硬件设计

1.2.1 图像传感器节点结构

图像传感器节点由图像采集模块、处理器模块、无线通信模块和供电模块组成,如图 2a 所示。图 2b 为节点的实物图。

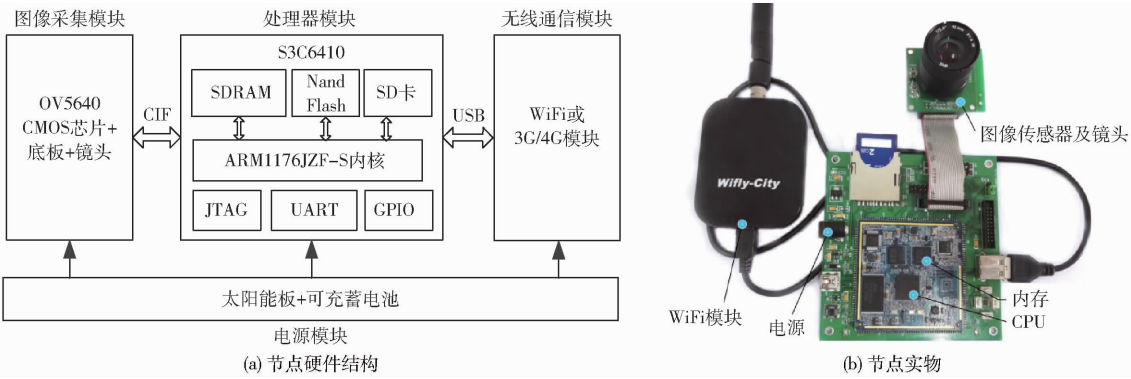


图 2 节点硬件结构与实物

Fig. 2 Hardware structure and node picture

1.2.2 图像采集模块

一般来说图像采集模块可通过两种方式得到：购买市面上的成品摄像头；购买图像传感器芯片，再定制一个小电路底板，并加装合适的镜头构成一个图像采集模块。两种方式的优劣比较如表 1 所示。基于成本和功能的考虑，本文选择了第 2 种方式，即自行开发图像采集模块，这样保证了图像传感器芯片的可选择性，更重要的是通过开发驱动可实现图像的高分辨率及分辨率的可调性。

表 1 图像采集模块方案比较

Tab.1 Comparison between two image acquisition module solutions		
方案	优点	缺点
成品摄像头	无需开发驱动，使用方便	价格昂贵；图像格式单一，分辨率固定且较低；驱动移植困难，无法进行二次开发和升级
传感器芯片	价格便宜；方便进行二次开发和升级；图像分辨率可调	需要定制 PCB 板并开发驱动程序

CMOS 和 CCD 是目前图像采集中使用最多的两种图像传感器^[16]。与 CCD 相比，CMOS 图像传感器具有体积小、成本低、功耗小、易控制等特点^[17]，且随着技术的进步，其成像质量已经接近甚至超过 CCD^[18]，因此，选用 CMOS 图像传感器芯片来设计图像采集模块。OV5642 是美国 OmniVision 公司 2010 年推出的新一代 CMOS 彩色图像传感器芯片，支持多种分辨率，最高分辨率可达 500 万像素，支持 5 种图像输出格式，具有自动曝光等多种图像控制功能，核心电压 1.5 V，模拟电压 1.8 V/2.8 V，工作时电流 140 mA，待机时电流 20 μ A^[19]。OV5642 与处理器模块 S3C6410 通过 20 针的 CIF (Camera interface) 接口相连，如图 3 所示。

1.2.3 处理器模块

由于节点需要采集、压缩和传输图像/视频数

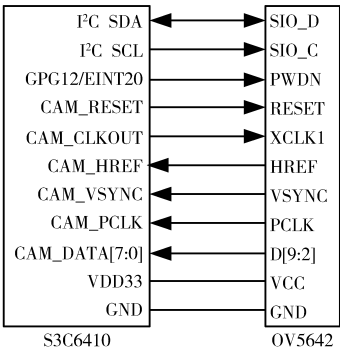


图 3 S3C6410 与 OV5642 的连接

Fig. 3 Connection between S3C6410 and OV5642

据，执行多任务调度，因此要求处理器有较高的性能。为此，选择以 S3C6410 核心板 + 自行设计的外围电路构成处理器模块。S3C6410 是 SAMSUNG 公司基于 ARM11 内核构建的低功耗、高性能多媒体处理器^[20]，主频高达 667 MHz，并带有 256 MB SDRAM 和 1 GB NANDFLASH，工作电流为 200 mA。S3C6410 集成了一个多格式编解码器 (Multi-format video coder, MFC)，支持 H. 264/MPEG4 编码和译码，以及 VCI 的解码，极大地提高了多媒体的处理效率。

1.2.4 汇聚节点和网关节点设计

汇聚节点和网关节点是监测系统的骨干节点，是在采集节点的基础上，通过软硬件升级得到。硬件上主要增加存储容量和蓄电池容量；汇聚节点增加一块 WiFi 网卡，用于和网关通信；网关节点增加一块 4G 模块，用于和服务端通信。软件上增加数据的转发模块，以实现数据格式的转换和数据的快速转发。

1.3 系统软件设计

考虑到节点既要执行图像处理任务，又要进行系统控制、以及负责接口与网络的管理，因此选择功能强大的嵌入式 Linux 作为操作系统，并在此基础上开发和移植相关的驱动、中间件，应用层采用模块

化设计,包含系统控制模块、图像采集与压缩模块、网络通信模块和数据存储模块。

1.3.1 节点工作流程

节点上电复位后,进行一系列初始化,接着设置休眠时间,并打开定时器,然后进入休眠状态,等待下一个工作周期的到来。休眠时间到,节点被唤醒,首先连接 Sink 节点,加入 WiFi 网络,然后启动图像传感器开始采集、压缩和传输图像,完成采集任务后,节点再次进入休眠状态,等待下一个工作周期的到来,节点工作流程如图 4 所示。

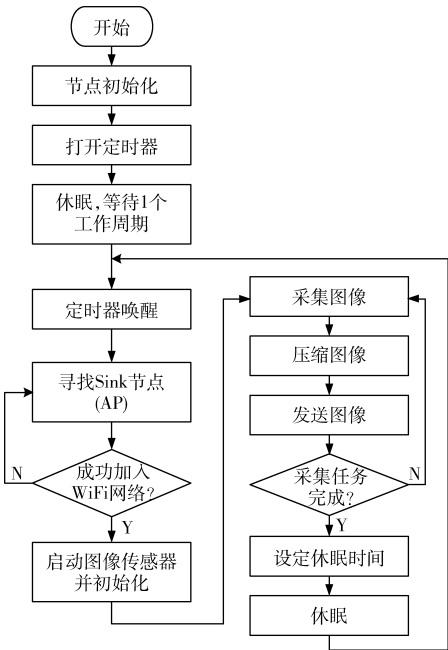


图 4 节点工作流程
Fig. 4 Workflow of node

1.3.2 分辨率实时调整算法

为满足用户对不同图像精度的需求,设计了基于驱动层和应用层协作的分辨率实时调整算法。在驱动层设计了 10 种不同的分辨率,最高可达 2 592 像素 × 1 944 像素,如表 2 所示。为实现分辨

表 2 OV5642 多级分辨率及寄存器配置表

Tab.2 Multilevel resolution and corresponding register configuration table of OV5642

分辨率索引	图像分辨率/(像素 × 像素)	寄存器配置表
0000	176 × 144	OV5642_QCIF[][3]
0001	320 × 240	OV5642_VQGA[][3]
0010	352 × 288	OV5642_CIF[][3]
0011	640 × 480	OV5642_VGA[][3]
0100	800 × 600	OV5642_SVGA[][3]
0101	1 024 × 768	OV5642_XGA[][3]
0110	1 280 × 1 024	OV5642_SXGA[][3]
0111	1 600 × 1 200	OV5642_UGA[][3]
1000	2 048 × 1 536	OV5642_QXGA[][3]
1001	2 592 × 1 944	OV5642_QSXGA[][3]

率的快速调整,为每一种分辨率设计一个对应的寄存器配置表。寄存器配置表是一个 $N \times 3$ 的二维数组,数组的行数 N 由待配置的寄存器数量决定;在每一行的 3 列数据中,前 2 列共同组成了待配置寄存器的 16 bits 地址,最后 1 列是待写入的配置数据。利用 I²C 协议将寄存器配置表中的配置数据写入相关寄存器即可实现对应分辨率^[20]。

驱动层多分辨率的设计为应用层根据用户指令选择不同分辨率奠定了基础。当用户发送修改分辨率的指令时,节点的应用层接收指令,并解析指令,然后提取分辨率调整参数(分辨率索引),并将其传递到驱动层,最后由驱动层完成分辨率调整,分辨率调整流程如图 5 所示。

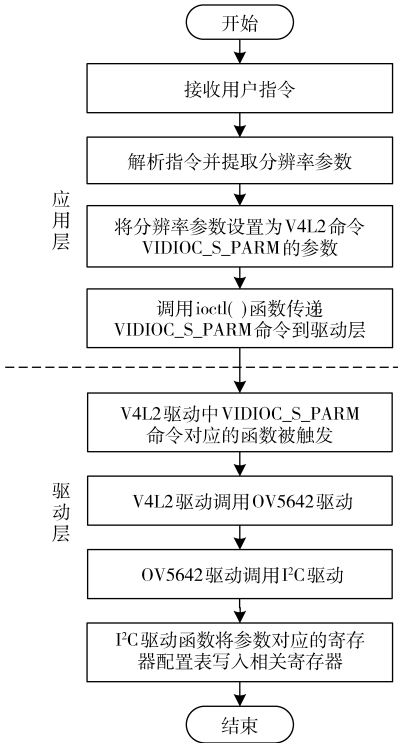


图 5 分辨率调整流程图

Fig.5 Flow chart of resolution adjustment

1.3.3 图像采集与传输

V4L2(Video for linux two)是 Linux 内核中访问音、视频设备的驱动框架^[21],为应用层提供了一系列的 API 接口,通过调用这些接口可实现图像采集。采集的静态图像压缩成 JPEG 格式图片保存在 SD 卡中,同时启动发送程序传输到服务器端;采集的视频进行硬件压缩并传输到服务器。

1.3.4 服务器应用软件

服务器是 WISN 和监测系统的应用核心。为有效地接收、存储、管理和分析节点采集的数据,并为用户提供网络服务,设计了基于 B/S 模式的可视化农情信息综合管理平台(Agricultural information comprehensive management platform, AICMP)。

由 7 个功能模块组成,如图 6 所示,既能管理笔者前期开发的稻田水分传感器网络^[22-24],也能管理本文设计的无线图像传感器网络。

AICMP 提供可视化操作功能,图 7 显示了用户登录服务器主页查看 WISN 网络拓扑结构及查看节点采集图像的情况,图中列出了网关节点、汇聚节点和采集节点的位置、距离,并标出了节点的编号。红色矩形代表网关,蓝色三角形代表汇聚节点,绿色圆圈代表采集节点。当单击图中节点时,会显示节点采集的最新图像及采集时间。

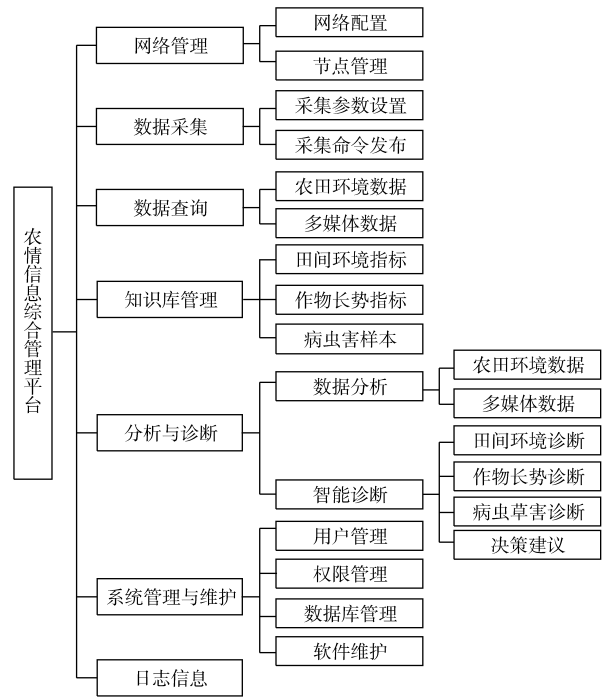


图 6 AICMP 的功能模块结构

Fig. 6 Functional schematic diagram of AICMP

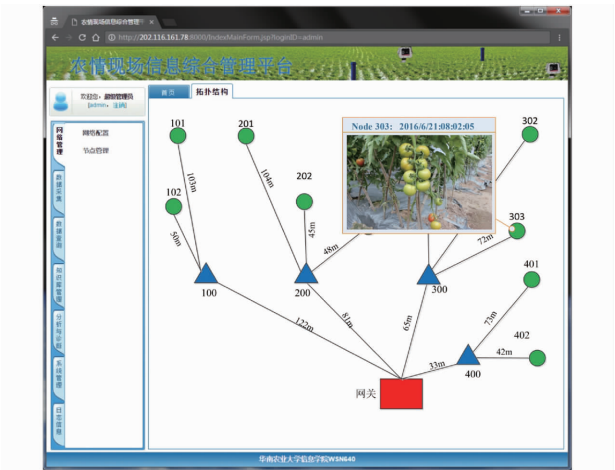


图 7 节点采集的最新图像

Fig. 7 Display of image captured by node

2 结果与讨论

2.1 节点部署与组网

为验证监测系统的稳定性,于 2016 年 6 月 5 日

开始在广东省农业技术推广总站(113.414 751°E、23.186 813°N)进行节点部署与组网,并开展 60 d 的综合测试实验。实验部署的拓扑结构如图 8 所示。

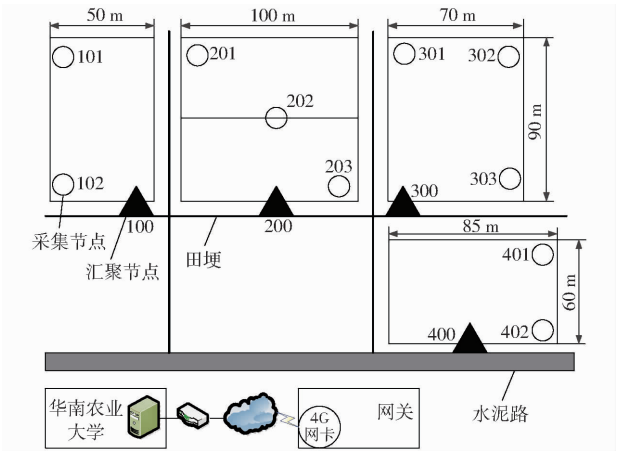


图 8 实验节点部署

Fig. 8 Deployment of nodes in experiment

2.2 多分辨率采集测试

多分辨率测试是为了验证节点能否按照系统设计的功能采集不同分辨率的图像。测试方法为:从服务器发送指令,控制节点采集 10 种不同分辨率的图像各 100 幅,并上传到服务器,图像压缩质量因子设置为 80%,表 3 列出了 10 种分辨率图像对应的平均大小,从中可以看出,随着分辨率的提高,采集图像的原始数据越来越大,压缩后的图像文件也越来越大,JPEG 的平均压缩比约为 8.6:1。

表 3 不同分辨率图像的平均大小

Tab. 3 Average size of images with different resolutions

图像分辨率/ (像素×像素)	原始图像大小/ KB	压缩后图像大小/ KB
176×144	74.25	9.43
320×240	225.00	23.15
352×288	297.00	34.53
640×480	900.00	126.45
800×600	1 406.25	171.49
1 024×768	2 304.00	261.82
1 280×1 024	3 840.00	446.51
1 600×1 200	5 625.00	657.64
2 048×1 536	9 216.00	1 047.27
2 592×1 944	14 762.25	1 658.24

为了体现不同分辨率图像清晰度的差异,选取 5 种分辨率图像进行对比分析,分辨率从左至右分别是 640 像素×480 像素、1 600 像素×1 200 像素、1 280 像素×1 024 像素、2 048 像素×1 536 像素和 2 592 像素×1 944 像素,如图 9 所示。从直观上看,图 9a 中同一目标的不同分辨率图像没有太大差异,肉眼无法直接区分它们的清晰度。为此,对图像进行放大以展现其细节的差异。为了便于比较和区

分,采集图像时放入水瓶盖,并对采集后的图像进行等比例放大,然后截取含水瓶盖的部分进行对比分析,如图 9b 所示,从中可以清晰地看到,随着图像分

辨率的提高,图像中水瓶盖图案越来越清晰,这表明分辨率高的图像具有更高的清晰度,也证明了本文设计的多分辨率方案是有效的。



图 9 节点采集的不同分辨率图像对比

Fig.9 Comparison between images captured by node with different resolutions

2.3 系统丢包率测试

表 4 列出了监测系统的 14 个节点(包括汇聚节

点)采集并传输不同分辨率图像时的丢包率统计情况,数据是统计 100 次的结果。

表 4 不同分辨率图像的传输丢包率

Tab.4 Packet loss ratio of images with different resolutions

节点编号	分辨率/(像素×像素)					%
	640×480	1 600×1 200	1 280×1 024	2 048×1 536	2 592×1 944	
100	1.67	1.61	1.78	1.64	1.67	
101	1.83	1.72	1.75	1.83	1.92	
102	1.81	1.72	1.93	1.92	1.72	
200	1.59	1.66	1.60	1.53	1.53	
201	1.74	1.78	1.87	1.66	1.80	
202	1.73	1.68	1.82	1.81	1.73	
203	1.69	1.72	1.57	1.80	1.70	
300	1.57	1.58	1.55	1.42	1.61	
301	1.68	1.79	1.53	1.80	1.77	
302	1.71	1.87	1.67	1.63	1.83	
303	1.66	1.55	1.72	1.58	1.61	
400	1.42	1.40	1.53	1.31	1.45	
401	1.65	1.59	1.62	1.75	1.65	
402	1.57	1.42	1.68	1.48	1.54	
平均值	1.67	1.65	1.69	1.65	1.68	
总平均值			1.67			

丢包率为

$$\lambda_{loss} = \frac{N_{sent} - N_{received}}{N_{sent}} \times 100\%$$
 (1)

式中 N_{sent} ——节点发送的数据包个数

$N_{received}$ ——服务器接收到的数据包个数

测试时,节点将发送 1 幅图像产生的数据包个数 N_{sent} 记录下来,待发送完图像后,将 N_{sent} 发送到服务器;服务器接收图像时,记录接收到的数据包个数 $N_{received}$,然后根据式(1)计算丢包率。从表 4 可以看出,所有节点平均丢包率为 1.67%,表明网络传输

稳定可靠,远程监测系统能够满足实际应用需求。

2.4 系统耗时测试

耗时测试的目的是检验网络中的节点采集和传输 1 幅图像到服务器所消耗的时间,它反映了监测系统的实时性。表 5 展示了 14 个采集节点执行 100 次采集任务的平均耗时情况,所采集的图像分辨率为 640 像素×480 像素。从表 5 可看出,14 个采集节点的平均耗时为 5.36 s,也就是说,在发出采集指令 5.36 s 后,服务器可以收到节点上传的图像,表明系统具有很好的实时性,能够满足农田环境

表 5 节点的时延
Tab. 5 Delay of node

参数	节点编号														平均值
	100	101	102	200	201	202	203	300	301	302	303	400	401	402	
图像大小/KB	126.35	124.82	120.36	123.41	129.64	127.81	123.26	130.38	129.54	131.47	128.34	126.42	128.67	119.96	126.45
耗时/s	5.05	5.72	5.53	4.97	5.58	5.41	5.35	4.88	5.66	5.71	5.64	4.79	5.42	5.38	5.36

和农作物实时监测的需要。同时发现,4 个汇聚节点平均耗时约为 4.92 s,小于其他节点的 5.54 s,因为它们采集的图像可以直接上传到网关,少了一次 WiFi 传输和转发。

2.5 视频监控测试

图 10 展示了客户端通过 HTTP 协议登录服务器开启 4 个节点视频监控的情况。视频采集的分辨率为 640 像素 × 480 像素,帧率为 25 f/s。H. 264 码

流的压缩比约为 106:1,4 个节点视频监控开启后,网络的视频码率平均为 3.32 Mb/s。从发出开启视频指令,到视频开始在客户端网页播放,平均时延约为 3.48 s。从测试情况来看,监控视频画面流畅,无卡顿情况,能够满足农田视频监控的需要。

3 结论

(1)设计了一种低成本、高分辨率的无线图像传感器节点和基于应用层与驱动层协作、多线程并发的分辨率实时调整算法,使节点具有 10 种不同的分辨率,最高可达 500 万像素,且分辨率可根据用户需求实现远程、实时调整。

(2)基于所设计的节点,提出了基于 WiFi + 4G 的农田实时监测系统 and 基于 Web 的可视化农田信息管理软件,实现了农田图像和视频信息的自动采集、远程传输、有效存储和高效网络应用。

(3)对监测系统进行了综合测试试验,试验结果表明系统能稳定运行,节点能够自动采集、压缩并传输 10 种不同分辨率的图像,采集并传输 1 幅大小为 126 KB 左右的图像消耗的时间约为 5.36 s,网络平均丢包率为 1.67%;视频监控播放流畅,无卡顿情况,播放时延约为 3.48 s。

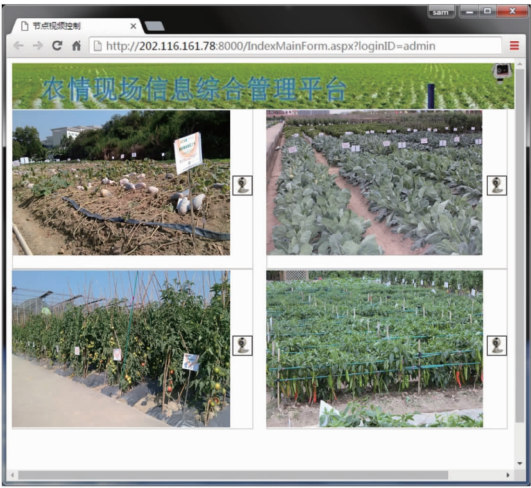


图 10 节点视频监控
Fig. 10 Video monitoring of node

参 考 文 献

1 熊迎军,沈明霞,孙玉文,等. 农田图像采集与无线传输系统[J]. 农业机械学报,2011,42(3): 184 – 187.
XIONG Yingjun, SHEN Mingxia, SUN Yuwen, et al. Design on system of acquisition and wireless transmission for farmland image [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 184 – 187. (in Chinese)

2 ZHAO L Q, YIN S Y, LIU L B, et al. A crop monitoring system based on wireless sensor network[J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 11(Part B): 558 – 565.

3 SRITARAPIPAT T, RAKWATIN P, KASETKASEM T. Automatic rice crop height measurement using a field server and digital image processing[J]. Sensors, 2014, 14(1):900 – 926.

4 MORA M, AVILA F, CARRASCO-BEMAVODES M, et al. Automated computation of leaf area index from fruit trees using improved image processing algorithms applied to canopy cover digital fotografapies[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2016, 123:195 – 202.

5 贾洪雷,王刚,郭明卓,等. 基于机器视觉的玉米植株数量获取方法与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(3):215 – 220.
JIA Honglei, WANG Gang, GUO Mingzhuo, et al. Methods and experiments of obtaining corn population based on machine vision [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 215 – 220. (in Chinese)

6 BECHAR I, MOISAN S, THONNAT M, et al. On-line video recognition and counting of harmful insects [C] // 2010 20th International Conference on Pattern Recognition (ICPR), 2010: 4068 – 4071.

7 肖德琴,傅俊谦,邓晓晖,等. 基于物联网的桔小实蝇诱捕监测装备设计及试验[J]. 农业工程学报,2015,31(7):166 – 172.
XIAO Deqin, FU Junqian, DENG Xiaohui, et al. Design and test of remote monitoring equipment for bactrocera dorsalis trapping based on internet of things[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(7): 166 – 172. (in Chinese)

8 GARCIA-SANCHEZ A, GARCIA-SANCHEZ F, GARCIA-HARO J. 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.
- 9 PHAM C, LECUIRE V. Building low-cost wireless image sensor networks: from single camera to multi-camera system[C]//ACM International Conference on Distributed Smart Cameras, 2015:158–163.
- 10 GONZALEZ M, SCHANDY J, WAINSTEIN N, et al. Wireless image-sensor network application for population monitoring of lepidopterous insects pest (moths) in fruit crops[C]//2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2014:1394–1398.
- 11 PAEK J, HICLS J, COE S, et al. Image-based environmental monitoring sensor application using an embedded wireless sensor network[J]. Sensors, 2014,14(9):15981–16002.
- 12 THULASIPRIYA C, PRAVEEN K, SRIVIDYA A. Monitoring of pest insect traps using image sensors & dspic[J]. International Journal of Engineering Trends and Technology, 2013,4:4088–4093.
- 13 LLORET, BOSCH I, SENDRA S, et al. A wireless sensor network for vineyard monitoring that uses image processing[J]. Sensors, 2011,11(12):6165–6196.
- 14 姚仲敏, 荆宝刚, 孙彩苹. 基于移动无线传感器网络的植株图像监测系统设计与测试[J]. 农业工程学报, 2016,32(11):189–196.
- YAO Zhongmin, JING Baogang, SUN Caiping. Design and test of plant image monitoring system based on mobile wireless sensor network[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(11): 189–196. (in Chinese)
- 15 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/OL]. 农业机械学报, 2013,44(1):167–173. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130132&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.032.
- YANG Xinting, WU Tao, SUN Chuanheng, et al. Remote monitoring system of crop environment and growing based on WMSN [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(1):167–173. (in Chinese)
- 16 FOSSUM E R, HONDONGWA D B. A review of the pinned photodiode for CCD and CMOS image sensors[J]. IEEE Journal of the Electron Devices Society, 2014,2(3):33–43.
- 17 晋孝峰, 岳素格, 刘丽艳, 等. CMOS 图像传感器的硬复位电路研究[J]. 电子学报, 2014,42(1):182–186.
- JIN Xiaofeng, YUE Suge, LIU Liyan, et al. Research on CMOS image sensor hard reset circuit[J]. Acta Electronica Sinica, 2014,42(1):182–186. (in Chinese)
- 18 刘杰, 朱天成. 基于 CMOS 工艺的无线图像传感器网络综述[J]. 微计算机信息, 2012(2):133–135.
- LIU Jie, ZHU Tiancheng. Wireless image sensor network based on CMOS technology[J]. Microcomputer Information, 2012(2): 133–135. (in Chinese)
- 19 OMNI VISION INC. OV5642 datasheet[EB/OL]. (2009–08–18)[2016–11–01]. <http://www.docin.com/p-186847439.html>.
- 20 杨阔, 何东健. 基于 S3C6410 的田间视频监控系统的实现[J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(6):1978–1982.
- YANG Kuo, HE Dongjian. Implementation of field video monitoring system based on S3C6410[J]. Computer Engineering and Design, 2013,34(6):1978–1982. (in Chinese)
- 21 殷建军, 肖德琴, 黄顺彬. CMOS 图像传感器多分辨率驱动算法设计[J]. 计算机工程与设计, 2014, 35(9):3045–3049.
- YIN Jianjun, XIAO Deqin, HUANG Shunbin. Design of CMOS image sensor multi-resolution driver algorithm[J]. Computer Engineering and Design, 2014,35(9):3045–3049. (in Chinese)
- 22 肖德琴. 稻田水分传感器网络构建[D]. 广州:华南农业大学, 2009.
- XIAO Deqin. Study on paddy field moisture sensor network[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- 23 肖德琴, 古志春, 冯健昭, 等. 稻田水分监测无线传感器网络优化设计与试验[J]. 农业工程学报, 2011,27(2):174–179.
- XIAO Deqin, GU Zhichun, FENG Jianzhao, et al. Design and experiment of wireless sensor networks for paddy field moisture monitoring[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2): 174–179. (in Chinese)
- 24 XIAO D, FENG J, WANG N, et al. Integrated soil moisture and water depth sensor for paddy fields[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 98: 214–221.