

温室环境监控系统网关多进程调度方法

侯琛¹ 王海波² 刘凤之² 史祥宾² 赵千川¹

(1. 清华大学自动化系, 北京 100084; 2. 中国农业科学院果树研究所, 兴城 125100)

摘要: 作为应用层与感知层的桥梁, 网关通常具有多个进程。温室环境监控系统中各个进程间的调度是否合理直接影响到网关甚至温室环境监控系统的性能。针对网关的多进程调度问题, 研究并设计了一种网关的多进程调度算法 (Multiple thread schedule algorithm, MTSA)。该算法先通过网关向服务器推送数据的时间间隔、进程数目、最大功率与有效功率的关系来确定每个进程被挂起的时间片, 然后通过合理地控制每一个进程的执行顺序及执行时间片来有效地降低数据阻塞度。在实验中, 本文方法的数据丢失率为 3.4%, 而启发式方法的数据丢失率为 56%, 表明本文方法优于启发式方法。

关键词: 温室环境; 监控系统; 网关; 多进程; 调度

中图分类号: TP274.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)05-0167-07

Schedule Algorithm of Multiple Threads of Gateway of Environmental Monitoring System in Greenhouse

HOU Chen¹ WANG Haibo² LIU Fengzhi² SHI Xiangbin² ZHAO Qianchuan¹

(1. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China

2. Fruit Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xingcheng 125100, China)

Abstract: As Internet of things (IoT) has stepped out of the infancy and is gaining more and more popularity around the world, the gateway of environmental monitoring system has also always been attracting people's eyes. With the capability to bridge application layer with sensing layer, gateway usually possesses multiple threads. Reasonably scheduling these threads matters most to the performance of gateway even the environmental monitoring system. Targeting at reasonable schedule, a kind of multiple threads schedule algorithm was researched and developed (MTSA) to weaken data jam by suitable duration of pending each thread and reasonable control for the execution sequence of thread. This duration was subject to the interval between two operations of pushing data from gateway to Web Server, the number of threads, and the relationship between maximal and effective power consumption. In order to overcome the difficulty in deciding the duration of pending each thread just by experience, the multiple threads integrated into the gateway of the environmental monitoring system were firstly displayed, and then the specific steps of MTSA were presented. In addition, the duration of pending each thread in MTSA was determined by taking the relationship between the maximal and effective power consumption into consideration, and the impact of MTSA on weakening data jam was also analyzed. With the purpose of demonstrating the performance of MTSA, a field experiment in the grape greenhouse was carried out. In this experiment, the comparison between MTSA and a popular algorithm of heuristic method (HM) was done in terms of decreasing the data loss to check the higher efficiency of MTSA than HM in guaranteeing that Web was capable of receiving the environment data, including temperature, relative humidity and illumine. As for the experiment results, data loss by NTSA was only 3.4%, which was much more less than that of 56% by HM, which verified the use of MSTSA.

Key words: environment in greenhouse; monitoring system; gateway; multiple threads; schedule

收稿日期: 2016-08-31 修回日期: 2016-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(61425027, 61425024)、国家重点研发计划项目(2016YFB0901901)、中国农业科学院创新工程项目(CAAS-ASTIP-2015-RIP-04)和信息物理融合系统创新联合研究中心项目

作者简介: 侯琛(1989-), 男, 博士生, 主要从事资源约束条件下的物联网运行控制研究, E-mail: houc15@mails.tsinghua.edu.cn

通信作者: 赵千川(1969-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事复杂网络研究, E-mail: zhaoqc@tsinghua.edu.cn

引言

农业物联网致力于农业的智能化与信息化,以软件和信息为中心,通过农业现场的大量传感器节点、自动化设备、网络设备和远程监控设备改变了农业生产方式,提高了土地利用效率,降低了农业污染,解放了农业生产力^[1-5]。

在物联网的推动下,人类已经在温室环境监控领域取得了一系列先进的成果。例如,张猛等^[6]研究并实现了一种基于 ZigBee 与 Internet 的温室群环境远程监控系统。王浩云等^[7]在有限状态机和事件晶格的基础上搭建了时空温室环境监控系统。杨玮等^[8]研究并实现了以 ZigBee 为无线通信模块的温室智能终端。PARK 等^[9]提出了一种基于无线传感网络的温室环境监控系统。HWANG 等^[10]提出了一种温室环境监控服务器系统。

温室环境监控系统涉及多个处理器:嵌入式微处理器、嵌入式微控制器、嵌入式数字信号处理器、嵌入式片上处理器和通用计算机处理器^[11]。不同处理器可能处于不同的状态,例如休眠状态、工作状态和认证状态^[12]。一个处理器代表着一个进程,各处理器间的高效通信依附于网关^[13]。为了满足这种高效通信,一个网关往往具备并需要调度多个进程,以降低数据阻塞。

针对网关的多进程调度问题,CHEN 等^[14]提出了一种基于动态中央处理单元的频率水准测量法来减少多处理器中的数据阻塞。姚伟等^[15]在上位机检测软件与下位机可编程逻辑控制器合理交互的基础上搭建了温室大棚智能环境检测与调节系统。GIL 等^[16]提出了一种多线程标色方案用于管理处理器的资源信息。LOOMANS^[17]提出了一系列多线程管理技术以降低异步环境下的不同线程间的冲突。RODGERS 等^[18]提出了一种多线程身份标注方法用于检测多线程的变动情况。JIANG 等^[19]提出了一种多进程间的通信方法。OTTONI 等^[20]采用软件解耦流水线法完成了多线程的提取。

但已有工作所采用的多进程调度方法的进程挂起时间片大多根据经验设置。进程挂起时间片的确没有考虑系统的具体工作情况。本文研究并设计一种网关的多进程调度算法(Multiple thread schedule algorithm, MTSA)。该算法先通过网关向服务器推送数据的时间间隔、最大功率与有效功率的关系来确定每个进程被挂起的时间,然后通过合理地控制每一个进程的执行顺序及执行时间片来有效地降低数据阻塞度。

1 网关载体——温室环境监控系统架构

网关是温室环境监控系统的重要组成部分。本文的温室环境监控系统先采集温室内的温度、湿度和光照,然后将其上传至 Web 服务器。系统的硬件架构如图 1a 所示^[10],数据流如图 1b 所示。网关具备 6 个进程,是应用层与感知层间的桥梁。图 2 列出了网关的 6 个进程(服务器含有卷膜/帘机的控制命令)。

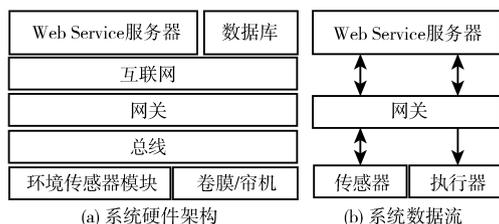


图 1 系统硬件架构与数据流

Fig. 1 Hardware structure and data stream of system



图 2 网关中的进程

Fig. 2 Multiple threads in gateway

2 网关多进程调度算法 MTSA

2.1 MTSA 算法的具体步骤

在一个周期内(虽然干扰与延迟的存在使得此处的周期并不固定,但是根据大数定律,可以认为此处的周期服从正态分布),网关按照如下步骤调度各个进程:

步骤 1:网关开启“给底层传感器发送读取数据请求”的进程,将读取数据的请求发送至底层传感器(读取数据的请求帧携带有对象传感器的标识信息)。

步骤 2:根据是否成功接收到传感器的确认信息判断接下来的动作。

步骤 2.1:当网关确认步骤 1 的请求发送完毕且传感器成功收到该请求后(传感器成功收到该请求后会向网关发送确认信息帧),挂起“给底层传感器发送读取数据请求”的进程 2 s,并开启“从底层传感器获取环境参数采样”的进程。

步骤 2.2:如果网关没有接收到传感器的确认

信息,那么循环执行“给底层传感器发送读取数据请求”的操作。网关如果在 10 s 内仍然没有收到该传感器的确认信息,那么认为该传感器已经卸载或发生了故障,并记录下该传感器的标识信息,随后挂起“给底层传感器发送读取数据请求”的进程 2 s。

步骤 3: 如果步骤 2.1 执行顺利,即网关能够收到传感器的确认信息,那么网关接收并暂时存储该传感器的采样,然后挂起“从底层传感器获取环境参数采样”的进程 2 s; 如果步骤 2.2 执行顺利,即网关发现了卸载或故障的传感器,那么在下一个周期中,网关停止读取该传感器的数据。

步骤 4: 网关开启“给底层卷膜/帘机发送读取状态请求并获取该状态”的进程,将读取卷膜/帘机状态的请求发送至底层卷膜/帘机模块(读取状态的请求帧携带有对象卷膜/帘机的标识信息)。

步骤 5: 根据是否成功接收到卷膜/帘机模块的确认信息判断接下来的动作。

步骤 5.1: 当网关确认步骤 4 的请求发送完毕且接收到卷膜/帘机的状态后,挂起“给底层卷膜/帘机发送读取状态请求并获取该状态”的进程 2 s。

步骤 5.2: 如果网关没有接收到卷膜/帘机的状态,那么循环执行“给底层卷膜/帘机发送读取状态请求并获取该状态”的操作。网关如果在 10 s 内仍然没有收到该卷膜/帘机的状态,那么认为该卷膜/帘机已经卸载或发生了故障,并记录下该卷膜/帘机的标识信息,随后挂起“给底层卷膜/帘机发送读取状态并获取该状态”的进程 2 s。

步骤 6: 如果步骤 5.1 执行顺利,即网关能够收到卷膜/帘机的状态,那么网关暂时存储该卷膜/帘机的状态; 如果步骤 5.2 执行顺利,即网关发现了卸载或故障的卷膜/帘机,那么在下一个周期中,网关停止读取该卷膜/帘机的状态。

步骤 7: 判断本周期的卷膜/帘机的状态是否与上一个周期的相同,如果相同,那么接下来的步骤 8 无需将卷膜/帘机状态推送至 Web 服务器,否则需要推送(卷膜/帘机状态的变化频率远低于环境参数的变化频率,当卷膜/帘机状态与上一个周期的状态不相同,网关才会将该状态推送至服务器,否则无需推送,同时,服务器将卷膜/帘机在此周期的状态取为上一个周期内的状态)。

步骤 8: 网关开启“向服务器推送数据”的进程,将获取到的与传感器有关的信息(如果数据读取正常,那么该信息就是网关自身的标识信息和传感器的环境参数采样; 如果不正常,那么该信息就是网关自身的标识信息和卸载或故障传感器的标识信息)以及与卷膜/帘机有关的信息(如果状态读取正常

且在相邻 2 个周期内读取到的状态不相同,那么该信息就是网关自身的标识信息和卷膜/帘机的实际状态; 如果不正常,那么该信息就是网关自身的标识信息和卸载或故障卷膜/帘机的标识信息)推送至 Web 服务器。

步骤 9: 根据是否成功推送数据判断接下来的动作。

步骤 9.1: 当网关确认步骤 8 的信息推送完毕且收到了来自 Web 服务器的确认信息后,就挂起“向服务器推送数据”的进程 2 s,随后开启“从服务器获取控制命令”的进程。

步骤 9.2: 如果网关没有接收到 Web 服务器的确认信息,那么循环执行“向服务器推送数据”的操作。网关如果在 10 s 内仍然没有收到该 Web 服务器的确认信息,那么认为此刻的网络不利于数据的推送,于是,暂时存储该信息,并挂起“向服务器推送数据”的进程。

步骤 10: 如果步骤 9.1 执行顺利,即网关能够收到 Web 服务器的确认信息,那么网关挂起“从服务器获取控制命令”的进程 2 s,并暂时存储该控制命令; 如果上述步骤 9.2 能够被顺利执行,即认为此刻的网络不利于数据的推送,那么网关在下一个周期内除了要向服务器推送该周期内需要推送的信息,还需要继续向服务器推送步骤 9.2 需要推送的信息,如果在连续 3 个周期内,步骤 9.2 需要推送的信息都无法被推送到服务器,那么丢弃该信息。

步骤 11: 判断步骤 10 接收到的控制命令是否与被控对象矛盾,即判断对象卷膜/帘机是否卸载或故障,如果是,那么跳过“给卷膜/帘机发送控制命令”的进程,并报警提示; 如果不是,那么开启“给卷膜/帘机发送控制命令”的进程。如果在 10 s 之内,网关检测不到卷膜/帘机的正确动作,那么认为该命令不正确,并再次向服务器获取控制命令。如果在本周期内,命令不正确的现象出现 3 次,那么停止向卷膜机/帘机发送控制命令。

步骤 12: 关闭所有进程,然后再开启,跳回步骤 1。

2.2 MTSA 算法进程挂起时间片的确定

在本文的调度方法中,每个进程被单独挂起到下一个进程被单独开启的时间间隔是 2 s。其确认方法如下: 根据大数定律,可以认为 MTSA 的周期服从正态分布。因为网关需要每隔 2 min,即 120 s,向服务器推送一次数据,所以认为 MTSA 的周期服从均值为 120 s、方差未知的正态分布,即,如果用 T 、 μ 和 σ^2 分别表示周期、均值和方差,那么得到

$$T \sim N(\mu, \sigma^2) \quad (1)$$

其中 $\mu = 120$, σ^2 未知。考虑到系统的有效功率与

最大功率的关系(整个系统采用交流电供电,系统的直流设备采用交流转直流的适配器供电。交流电的最大功率是有效功率的 $\sqrt{2}$ 倍),希望周期 T 落在区间 $(\mu - \sqrt{2}\sigma, \mu + \sqrt{2}\sigma)$ 内。由正态分布的概率密度可得

$$P(\mu - \sqrt{2}\sigma < T < \mu + \sqrt{2}\sigma) = P\left(-\sqrt{2} < \frac{T - \mu}{\sigma} < \sqrt{2}\right) = 2\varphi(\sqrt{2}) - 1 = 0.84 \quad (2)$$

因为在 MTSA 中,当需要循环执行某个进程时,循环的总时间为 10 s,所以每一个进程被单独挂起到下一个进程被单独开启的时间间隔为

$$\left\lfloor \frac{(120 - 10 \times 4) \times [1 - P(\mu - \sqrt{2}\sigma < T < \mu + \sqrt{2}\sigma)]}{6} \right\rfloor = 2 \text{ s} \quad (3)$$

其中等式左端的向下取整符号表示保留运算结果的整数部分。

2.3 MTSA 算法对数据阻塞的影响

一方面,MTSA 的时间间隔为进程的切换提供了缓冲空间,这能避免多进程拥塞所带来的数据阻塞;另一方面,MTSA 通过如下措施排除无需发送的信息或冗余的信息来降低数据阻塞:

(1) MTSA 的步骤 2.2 能够将卸载或故障的传感器从系统剔除,所以,在下一个周期内,网关无需占用总线资源向该传感器发送读取数据的请求,这有利于降低总线上的数据阻塞。

(2) MTSA 的步骤 5.2 能够将卸载或故障的卷膜/帘机从系统剔除,所以,在下一个周期内,网关无需占用总线资源向该卷膜/帘机发送读取状态的请求,这也有利于降低总线上的数据阻塞。

(3) MTSA 的步骤 7 先判断本周期的卷膜/帘机的状态是否与上一个周期的相同,如果相同,那么步骤 8 无需将本周期的卷膜/帘机的状态推送至 Web 服务器,所以,网关无需占用网络资源将重复的卷膜/帘机的状态推送至 Web 服务器,这有利于降低 Web 通信的数据阻塞。

(4) MTSA 的步骤 9.2 在认为网络不利于数据的推送时,暂时停止向服务器推送数据,这也有利于降低 Web 通信的数据阻塞,同时能够减小数据的丢失。

(5) 在 MTSA 的步骤 10 中,如果在连续 3 个周期内,步骤 9.2 需要推送的信息都无法被推送到服务器,则丢弃该信息,所以,网关无需再占用网络资源将此贬值的信息推送至 Web 服务器,这有利于降低 Web 通信的数据阻塞。

(6) MTSA 的步骤 11 先判断收到的控制命令是

否与被控对象矛盾,即判断被控的卷膜/帘机是否已经卸载或故障,如果是,那么网关无需将控制命令发送至该卷膜/帘机,所以,网关无需占用总线资源向该卷膜/帘机发送控制命令,这有利于降低总线上的数据阻塞。

3 实验验证

3.1 环境监控系统

在清华大学信息科学与技术国家实验室和辽宁省兴城市中国农业科学院果树研究所的葡萄栽培试验基地对本文的多进程调度算法(MTSA)进行了实验验证。搭建温室环境监控系统,如图 3 所示。Web 服务器及其数据库被安装在清华大学信息科学与技术国家实验室的 3 区 624 房间内,将系统的其余部分(包括网关),安放在辽宁省兴城市中国农业科学院果树研究所葡萄温室里。

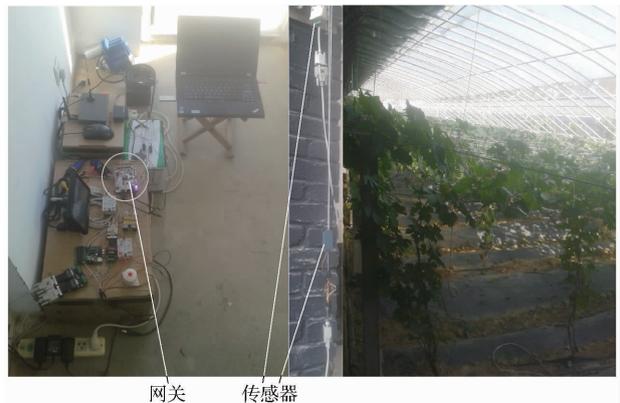


图 3 环境监控系统及其工作环境

Fig. 3 Environment-monitoring system and its working environment

在环境监控系统的基础上,通过比较 MTSA 与启发式方法(Heuristic method, HM)^[21-28]来验证 MTSA 的性能。具体操作如下:使 MTSA 和 HM 交替地工作在同一个网关上(采用同一个网关能避免不同网关之间的差异所带来的影响。交替工作意味着 MTSA 工作时, HM 休息, HM 与 MTSA 不能同时工作。表 1 列出了 HM 与 MTSA 各自工作的时间段。这些时间段是随机选择的,所以其长度并不相等),并观察环境监控系统在“MTSA 正常工作”与“HM 正常工作”期间的温度、湿度和光照采样是否符合正常采样。如果某一时间段内的采样接近正常采样,那么说明这一时间段内的数据阻塞小,反之,数据阻塞严重。一组采样包括一个温度采样、一个相对湿度采样和一个光照采样。网关每隔 63 s 向 Web 服务器推送一组采样,在没有数据丢失的情况下, Web 服务器应该从网关获取 400 组传感器采样。

表 1 交替工作时 MTSA 与 HM 各自工作的时间段

Tab.1 Running time of MTSA and HM when they worked alternatively

算法	交替工作的时间段
MTSA	10:00—10:40
	11:50—14:30
	15:50—17:00
HM	10:40—11:50
	14:30—15:50

3.2 HM 方法的具体实现

在解决具体问题时, HM 方法是一种根据经验规则进行发现的方法。实践活动经常采用“请求数据—获取数据—传输处理数据—根据数据传达命令”的经验规则或框架。本文的 HM 方法符合文献[21-28]HM 方法所采用的经验规则或框架。所以, HM 方法在本文通讯应用的具体实现步骤如下:

(1) 网关开启“给底层传感器发送读取数据请求”的进程, 将读取数据的请求发送至底层传感器。

(2) 当确认步骤(1)的命令被发送完毕且传感器接收到该请求后, 挂起“给底层传感器发送读取数据请求”的进程, 并开启“从底层传感器获取采样”的进程; 否则, 循环执行“给底层传感器发送读取数据请求”的进程, 直到底层传感器接收到该请求。

(3) 挂起“从底层传感器获取采样”的进程, 然后开启“给底层卷膜/帘机发送读取状态请求并获取该状态”的进程, 直到网关获取到膜/帘机的状态。

(4) 挂起“给底层卷膜/帘机发送读取状态请求并获取该状态”的进程, 然后开启“向服务器推送数据”的进程将传感器的采样与膜/帘机的状态推送至服务器, 直到数据推送成功。

(5) 挂起“向服务器推送数据”的进程, 然后开启“从服务器获取控制命令”的进程, 直到网关获取到该控制命令。

(6) 挂起“从服务器获取控制命令”的进程, 并开启“给卷膜/帘机发送控制命令”的进程, 直到膜/帘机获取到该命令, 随后跳转到步骤(1)。

3.3 实验中数据传输的量化测量

实验中的数据分为 Web 服务器接收到的数据与丢失的数据, 实验按照如下步骤进行数据传输的量化测量:

(1) 设置传感器采样在 Web 服务器端的记录形式。在某一时刻, 如果发生了数据阻塞, 那么网关无法正常地将此刻的传感器采样推送至 Web 服务器, 此刻的传感器采样在 Web 服务器端被记为 0。如果

数据传输正常, 那么此刻的传感器采样能够正常地传送至 Web 服务器并被 Web 服务器存储。

(2) 设置实验时间。实验时间是 10:00—17:00。网关每隔 63 s 向 Web 服务器推送一组传感器采样(一组传感器采样包含这一时刻的温度、相对湿度和光照), 在现有实验条件和没有数据丢失的情况下, Web 服务器应该从网关获取 400 组非零的传感器采样。

(3) 设置 MTSA 和 HM 的工作时间段。如前所述, 为了避免不同网关之间的差异所带来的影响, 让 MTSA 和 HM 交替工作在同一个网关上。3.1 节的表 1 显示 MTSA 的工作时间段是 10:00—10:40、11:50—14:30 和 15:50—17:00, 而 HM 的工作时间段是 10:40—11:50 和 14:30—15:50。所以, 在现有实验条件和没有数据丢失的情况下, MTSA 应该让 Web 服务器接收到 293 组非零的传感器采样, 而 HM 应该让 Web 服务器接收到 107 组非零的传感器采样。

(4) 记录使用 HM 与 MTSA 情况下 Web 服务器收集到的和丢失的传感器采样组数(Web 服务器端传感器采样值被记录为 0 的组数)。丢失率为丢失的传感器采样组数比上接收到的传感器采样组数与丢失的传感器采样组数的和, 由此计算 HM 和 MTSA 的丢失率。

3.4 温度、相对湿度和光照的正常采样

为了得到更加鲜明的对比, 在传感器校准的情况下, 图 4 分别给出了 2015 年 9 月 20 日 10:00—17:00 的温度、湿度和光照的正常采样。

在图 4c 的 11:00 左右, 光照大幅度下降, 这是因为, 在 11:00 左右, 温室管理人员减小了温室薄膜的开合度以避免温室内葡萄接触强光。在 14:40 与 15:50 之间, 温度下降, 湿度升高, 光照再一次下降, 这是因为, 在这段时间内, 温室管理人员在温室内以洒水的方式降低温度, 提升湿度, 并再次以减小温室薄膜开合度的方式避免葡萄接触强光。

3.5 MTSA 与 HM 的实验结果对比

在传感器校准的情况下, MTSA 和 HM 交替工作在同一个网关上的实验结果如图 5 所示。图 5 与图 4 同时说明:

(1) 在 MTSA 正常工作而 HM 休息的时间段内, 温室内的温度、湿度和光照采样接近正常采样。

(2) 在 HM 正常工作而 MTSA 休息的时间段内, 温室内的温度、湿度和光照采样为 0, 不正常。

(3) 采样的大量丢失正好发生在环境参数变化比较明显的时间段内, 这说明使用 HM 方法获取到的采样不能有效地反映温室内环境参数的变化情

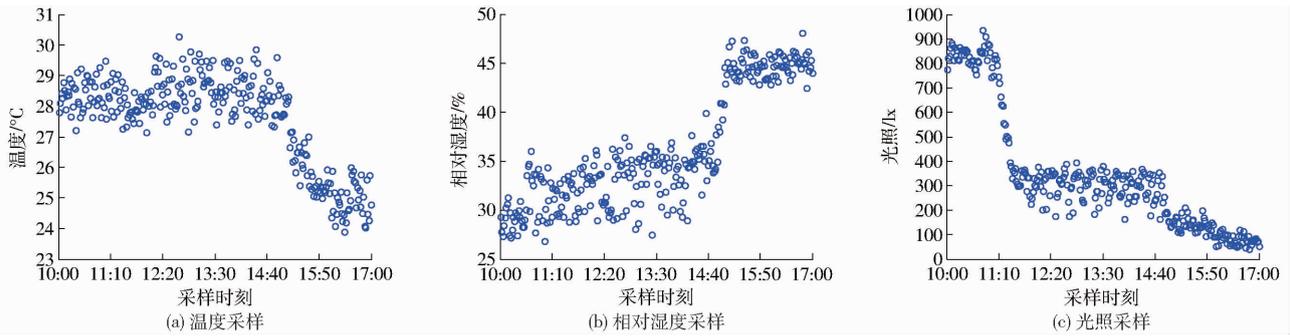


图4 10:00—17:00 的温度、相对湿度和光照的正常采样结果

Fig.4 Normal samples of temperature, relative humidity and illuminance from 10:00 to 17:00

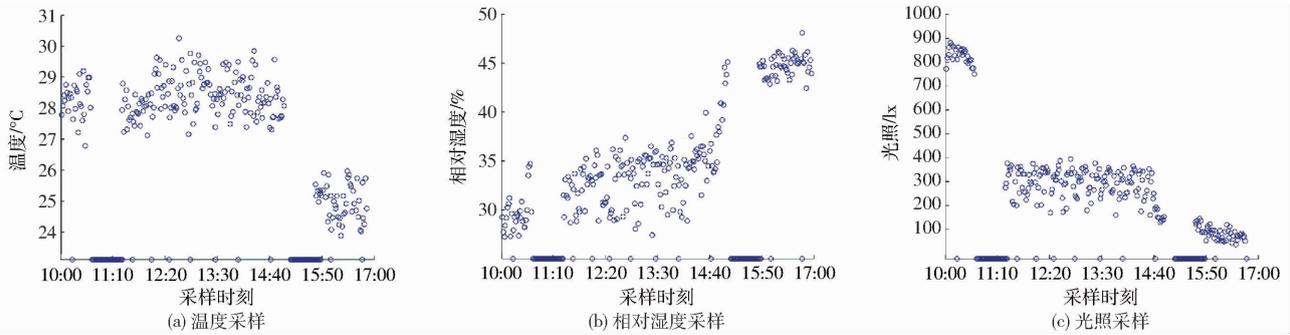


图5 MTSA 与 HM 交替工作时, 10:00—17:00 的温度、相对湿度和光照采样结果

Fig.5 Samples of temperature, relative humidity and illuminance when MTSA and HM worked alternately from 10:00 to 17:00

况。

HM 的数据丢失率是 56%, MTSA 的数据丢失率是 3.4%, 远低于 HM 的数据丢失率。具体如表 2 所示。

表 2 HM 和 MTSA 的数据丢失率

Tab.2 Data loss rate of HM and MTSA

算法	总时长/ min	收集到的 采样数/组	丢失的采样 数/组	丢失率/ %
HM	150	47	60	56
MTSA	270	283	10	3.4

如前所述, 一组采样包括一个温度采样、一个相对湿度采样、一个光照采样。此实验结果验证了 MTSA 的性能, 即能够合理地调度多进程从而降低数据阻塞。

3.6 HM 导致数据阻塞的原因

(1) 与 MTSA 不同, HM 不具备为进程间的切换提供缓冲空间的进程挂起时间片, 从而导致多进程拥塞, 进而带来数据阻塞。

(2) 与 MTSA 不同, HM 没有将卸载或故障的传感器、卷膜/帘机从系统剔除, 使得这些故障设备仍

占用一定的总线资源, 从而加大数据阻塞。

(3) 与 MTSA 不同, HM 没有对命令进行分析, 使得没有更新的或者与被控对象矛盾的命令仍占用 Web 通信资源, 从而加大数据阻塞。

(4) 与 MTSA 不同, HM 没有对 Web 通信环境进行判断, 使得“网关向 Web 服务器推送数据”的操作在通信环境不利的情况下仍被执行, 从而加大数据阻塞。

(5) 与 MTSA 不同, HM 没有丢弃掉贬值的信息, 使得该信息仍占用通信资源, 从而加大数据阻塞。

4 结束语

针对网络通信数据阻塞问题, 提出了一种温室环境监控系统网关的多进程调度算法 (MTSA), 给出了相应的理论依据, 分析了该调度算法对数据阻塞的影响。在正常采样的参照下, MTSA 方法与 HM 方法的对比验证了 MTSA 的性能 (MTSA 方法的数据丢失率为 3.4%, 远低于 HM 方法的丢失率 56%)。

参考文献

- 葛文杰, 赵春江. 农业物联网研究与应用现状及发展对策研究 [J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 222-230. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140735&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.07.035.
- GE Wenjie, ZHAO Chunjiang. State-of-the-art and developing strategies of agricultural internet of things [J/OL]. Transactions of

- the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 222 - 230. (in Chinese)
- 2 何勇, 聂鹏程, 刘飞. 农业物联网与传感器研究进展 [J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 216 - 226. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20131035&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.10.035.
- HE Yong, NIE Pengcheng, LIU Fei. Advancement and trend of internet of things in agriculture and sensing instrument [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 216 - 226. (in Chinese)
- 3 颜波, 石平. 基于物联网的水产养殖智能化监控系统 [J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 259 - 265. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140140&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.040.
- YAN Bo, SHI Ping. Intelligent monitoring system for aquaculture based on internet of things [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 259 - 265. (in Chinese)
- 4 HOU Chen, ZHAO Qianchuan. Bayesian prediction-based energy-saving algorithm for embedded intelligent terminal [J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2015, 23(12): 2902 - 2912.
- 5 HOU Chen, ZHAO Qianchuan. A new optimal algorithm for energy saving in embedded system with multiple sleep modes [J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2016, 24(2): 706 - 719.
- 6 张猛, 房俊龙, 韩雨. 基于 ZigBee 和 Internet 的温室群环境远程监控系统设计 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(25): 171 - 176.
- ZHANG Meng, FANG Junlong, HAN Yu. Design on remote monitoring and control system for greenhouse group based on ZigBee and Internet [J]. Transactions of the CASE, 2013, 29(25): 171 - 176. (in Chinese)
- 7 王浩云, 刘佼佼, 侯思宇, 等. 信息物理系统 (cyber-physical system) 时空建模方法及在温室控制中的应用 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 183 - 190.
- WANG Haoyun, LIU Jiaojiao, HOU Siyu, et al. Cyber-physical system spatio-temporal modeling method and its application in greenhouse control [J]. Transactions of the CASE, 2015, 31(15): 183 - 190. (in Chinese)
- 8 杨玮, 吕科, 张栋, 等. 基于 ZigBee 技术的温室无线智能控制终端开发 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 198 - 202.
- YANG Wei, LÜ Ke, ZHANG Dong, et al. Development of wireless intelligent control terminal of greenhouse based on ZigBee [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(3): 198 - 202. (in Chinese)
- 9 PARK D, PARK J. Wireless sensor network-based greenhouse environment monitoring and automatic control system for dew condensation prevention [J]. Sensors, 2011, 11(4): 3640 - 3651.
- 10 HWANG J, SHIN C, YOEH H. Study on an agricultural environment monitoring server system using wireless sensor networks [J]. Sensors, 2010, 10(12): 11189 - 11211.
- 11 侯琛, 赵千川, 李海涛, 等. 物联网中的嵌入式终端 [J]. 电子测量技术, 2014, 37(10): 113 - 118.
- HOU Chen, ZHAO Qianchuan, LI Haitao, et al. The embedded terminal in the Internet of Things [J]. Electric Measurement Technology, 2014, 37(10): 113 - 118. (in Chinese)
- 12 侯琛, 赵千川, 冯浩然, 等. 一种物联网智能数据采集系统的研究与实现 [J]. 电子测量技术, 2014, 37(6): 108 - 114.
- HOU Chen, ZHAO Qianchuan, FENG Haoran, et al. Research and implementation of a kind of intelligent data-collection system in the Internet of Things [J]. Electric Measurement Technology, 2014, 37(6): 108 - 114. (in Chinese)
- 13 侯琛. 嵌入式物联网网关及应用方案的设计与实现 [D]. 北京: 清华大学, 2015.
- HOU Chen. Design and realization on the embedded gateway in the Internet of Things [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015. (in Chinese)
- 14 CHEN K, CHEN F, HOU T. The power-saving approach by critical section detections of multi-cores embedded systems [C] // 2010 2nd International Conference on Mechanical and Electronics Engineering (ICMEE), 2010, 1: V1 - 117 - V1 - 121.
- 15 姚伟, 徐世许, 殷欣, 等. 温室大棚环境智能检测与调节系统研究 [J]. 青岛大学学报: 工程技术版, 2015, 30(3): 38 - 42.
- YAO Wei, XU Shixu, YIN Xin, et al. Intelligent measurement and conditioning system research on greenhouse environment [J]. Journal of Qingdao University: Engineering Technology Edition, 2015, 30(3): 38 - 42. (in Chinese)
- 16 GIL M, PINILLA R. Thread coloring: a scheduler proposal from user to hardware threads [J]. ACM SIGOPS Operating Systems Review, 2005, 39(2): 54 - 70.
- 17 LOOMANS J. Techniques for managing multiple threads in a browser environment: US 6,728,960 [P]. 2004 - 04 - 27.
- 18 RODGERS D, BOGGS D, MERCHANT A, et al. Method and apparatus for entering and exiting multiple threads within a multithreaded processor: US 6,889,319 [P]. 2005 - 05 - 03.
- 19 JIANG H, DWYER M. Thread to thread communication: US 7,861,249 [P]. 2010 - 12 - 28.
- 20 OTTONI G, RANGAN R, STOLER A, et al. Automatic thread extraction with decoupled software pipelining [C] // Proceedings of the 38th Annual IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture, 2005: 105 - 118.
- 21 NOCERA S, MAINO F, CAVALLARO F. A heuristic method for determining CO₂ efficiency in transportation planning [J]. European Transport Research Review, 2012, 4(2): 91 - 106.
- 22 DHULIPALA V R S, KARTHIK N, CHANDRASEKARAN R M. A novel heuristic approach based trust worthy architecture for wireless sensor networks [J]. Wireless Personal Communications, 2013, 70(1): 189 - 205.
- 23 谭文学, 赵春江, 陆玲, 等. 基于启发式规则推理的多媒体农业专家系统开发平台的开发与研究 [J]. 计算机与现代化, 2003(7): 1 - 3.
- TAN Wenxue, ZHAO Chunjiang, LU Ling, et al. Research and development of illuming-rule-based reasoning multimedia platform for agricultural intelligent system development [J]. Computer and Modernization, 2003(7): 1 - 3. (in Chinese)
- 24 DE FRUTOS R M G, CASAA-MENDEZ B V. A hybrid heuristic algorithm with application to a graphical interface for vehicle routing optimization in an agricultural cooperative [C]. arXiv:1607.02377, 2016.
- 25 赵斌, 王克奇, 匡丽红. 温室环境进化 RBF 网络控制模型的研究 [J]. 中国农学通报, 2010, 26(8): 341 - 344.
- ZHAO Bin, WANG Keqi, KUANG Lihong. Research on greenhouse environmental RBFNN control model based on ES [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(8): 341 - 344. (in Chinese)
- 26 李迎霞, 杜尚丰. 可控环境专家控制初探 [C] // 2003 年中国智能自动化会议论文集 (上册), 2003: 21 - 24.
- LI Yingxia, DU Shangfeng. Research on expert control of controlled environment [C] // The Conference Proceedings of CIAC2003, 2003: 21 - 24. (in Chinese)
- 27 MARTINSEN J K, GRAHN H, ISBERG A. Heuristics for thread-level speculation in web applications [J]. IEEE Computer Architecture Letters, 2014, 13(2): 77 - 80.
- 28 BULPIN J R, PRATT I. Hyper-threading aware process scheduling heuristics [C] // USENIX Annual Technical Conference, 2005: 399 - 402.