

多传感器作物表型时间同步采集方法

赵燕东^{1,2} 刘浩宇^{1,2} 宋润泽³ 盛文溢³ 张漫³

(1. 北京林业大学工学院, 北京 100083; 2. 城乡生态环境北京实验室, 北京 100083;
3. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 在作物多源信息同步采集方面,集成多源传感器实现作物表型信息的同步采集,已成为当前作物表型获取的趋势。本文针对非结构化环境下动态同步采集关键难题,为精确同步地捕捉作物在特定时刻的多维表型特征数据,设计基于深度相机、双目相机、热红外相机、多光谱相机的固定式多表型性状的成像单元装置,开展基于精准时间协议(Precision time protocol, PTP)下传感器数据的时间同步采集研究,突破多源异构传感器时间同步并行采集技术,实现非结构化环境作物表型多维成像特征的时间同步采集。针对系统的时间同步性和稳定性,进行了连续72 h的测试,各传感器所属的授时板系统时钟(从时钟)与授时板1-PTP时钟(主时钟)之间的时间同步误差均方根均在132 ns以内,长期抖动均在286 ns以内。这一结果表明,时间同步误差符合技术指标要求;对农作物进行高强度的连续采样,进行了100次试验以评估系统的稳定性和可靠性,结果表明系统在整个试验过程中表现出良好的稳定性能,能够稳定地完成连续采集任务;在时间同步的条件下,各传感器通过授时板实现同步触发,采集时间误差控制在1 ms以内。该系统在稳定性和动态性能方面均符合农业生产的实际使用需求。

关键词: PTP; 作物表型; 时间同步; 多传感器

中图分类号: S761.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2025)03-0058-09 OSID: 

Multi-sensor Crop Phenotype Time Synchronous Acquisition Method

ZHAO Yandong^{1,2} LIU Haoyu^{1,2} SONG Runze³ SHENG Wenyi³ ZHANG Man³

(1. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. Beijing Laboratory of Urban and Rural Ecological Environment, Beijing 100083, China

3. School of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In the synchronous acquisition of crop multi-source information, integrating multi-source sensors to realize the synchronous acquisition of crop phenotype information has become the current trend of crop phenotype acquisition. Aiming at the key problem of dynamic synchronous acquisition in unstructured environment, in order to accurately and synchronously capture the multidimensional phenotypic feature data of crops at a specific time, a fixed multi-phenotypic trait imaging unit device was designed based on depth camera, binocular camera, thermal infrared camera and multispectral camera. The research on time synchronization acquisition of sensor data was carried out based on precision time protocol (PTP), broke through the time synchronization parallel acquisition technology of multi-source heterogeneous sensors, and realized the time synchronization acquisition of multi-dimensional imaging characteristics of crop phenotypes in unstructured environment. For the time synchronization and stability of the system, a continuous 72 h test was carried out. The root mean square error of time synchronization error between the system clock of the timing board of each sensor (slave clock) and the 1-PTP clock of the timing board (master clock) was less than 132 ns, and the long-term jitter was less than 286 ns. This result showed that the time synchronization error met the technical requirements. In order to evaluate the stability and reliability of the system, totally 100 experiments were carried out on crops with high intensity continuous sampling. The results showed that the system showed good stable performance in the whole experiment process, and can stably complete the continuous acquisition task. Under the condition of time synchronization, each sensor was synchronously triggered by the timing board, and the acquisition time

收稿日期: 2024-12-02 修回日期: 2024-12-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2002302-01)

作者简介: 赵燕东(1965—),女,教授,博士生导师,主要从事生态信息智能检测与控制研究,E-mail: yandongzh@bjfu.edu.cn

error was controlled within 1 ms. The stability and dynamic performance of the system met the actual needs of agricultural production.

Key words: PTP; crop phenotyping; time synchronization; multi-sensor

0 引言

在作物表型信息的高通量获取领域,多源信息同步采集已经成为一个重要趋势^[1-3]。通过集成多个传感器系统实现作物表型信息的同步采集,可以显著提高数据的丰富性和准确性^[4-5]。确保传感器数据在时间上的一致性至关重要,时间上的一致性确保了传感器采样数据的同步^[6-8]。

在非结构化环境下,作物的动态性增加了数据采集的复杂性。同步采集允许研究者精确捕捉作物在特定时刻的表型特征,如开花时间、叶片展开等,即使作物的位置或姿态因风、温度或其他环境因素而发生变化,也不会影响数据的一致性,这对于理解作物的生长状况、产量潜力和适应性具有重要意义。因此,时间同步成为解决多传感器数据不一致性问题的关键技术。通过高精度的时间同步,可以确保来自不同传感器的数据在时间上匹配,从而使得数据融合和分析成为可能。

针对同步采集,前提是传感器需要在严格的时间约束下协同工作,以提供实时的、精确的测量数据,确保多源数据的一致性。研究者针对多传感器时间同步提出了网络时间协议(Network time protocol, NTP)、精密时间协议(Precision time protocol, PTP)以及基于硬件的同步机制^[9-11]。李彩华等^[12]基于卫星导航系统(Global positioning system, GPS)授时和秒脉冲信号(Pulse per second, PPS)实现了授时中心和时间接受模块之间的时间同步误差均小于 200 ns。李雄伟等^[13]基于 PTP 精确时间协议和 AD7771 采集卡设计出分布式桥梁健康监测系统。单飞桥等^[14]基于 PTP 协议和反向自适应卡尔曼滤波算法设计出无线传感器网络时间同步方法。FERRARI 等^[15]基于 PTP 协议实现位移传感器时间同步误差在 20 μs 内。

在现代农业表型研究领域,多传感器系统在实际部署中普遍面临时间同步采集的难题,这一问题在作物表型系统研究中尤为突出,但目前关于作物表型系统的多传感器时间同步采集的研究相对较少。鉴于此,本研究提出一种基于 PTP 协议,用于实现作物表型系统多传感器时间同步采集的方案。该方法依托于 PTP 协议的高精度时间同步能力,通过在各授时板之间建立精确的时间同步,确保多传感器在授时板协同控制下时间同步采集,研发适用

于非结构化环境的作物多源异构表型信息同步采集核心部件和关键技术,以增强作物表型系统多传感器数据融合的时间同步精度和系统可靠性。

1 作物表型信息采集系统设计

1.1 系统硬件设计

本文设计的作物表型系统主要通过 RGB 图像、红外热图、点云图、多光谱图对作物长势进行分析,监测作物的生长状况。该表型系统由两部分组成:采集授时部分和传感器部分。表型采集装置实物如图 1 所示,系统设计框图如图 2 所示。

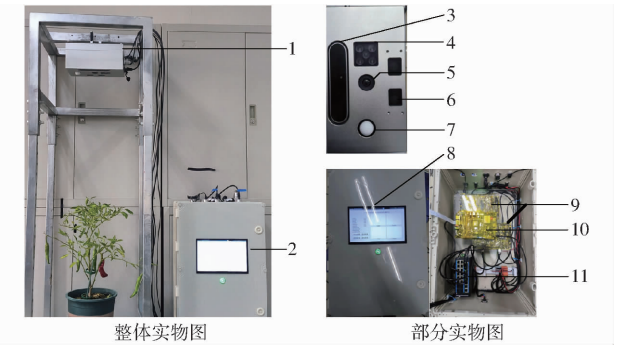


图 1 表型采集装置实物图

Fig. 1 Physical drawing of phenotype acquisition device
1. 传感器部分 2. 采集授时部分 3. 深度相机 4. 多光谱相机
5. 热红外相机 6. 双目相机 7. 多光谱下行光传感器 8. GUI
9. 授时板 10. 主控板 11. PTP 交换机

采集授时部分由以下组件组成:

- 1 个 RK3588 主控(迅为 iTOP-RK3588,北京迅为电子有限公司),负责全局控制采集和数据汇总。
- 1 个 PTP 交换机(SYN2421 型 IEEE1588 工业以太网交换机,西安同步电子科技有限公司),用于基于局域网链接多台设备并构建 PTP 时间同步域和数据传输。

4 个授时板(HZ-EVM-RK3568,北京合众恒跃科技有限公司),实现时间同步,并对各传感器进行授时及数据采集控制和回传。

4 个网卡(千兆双电 RJ45F902T,北京光润通科技发展有限公司),用于数据传输和支持 PTP 硬件时间戳同步方式。

传感器部分由以下组件组成:

芯视通双目相机位于作物上方,挂载方向为垂直向下,其主要作用为采集作物冠层的彩色信息,通过图像处理得到作物的各类信息如覆盖度、病理情况^[16-19]。

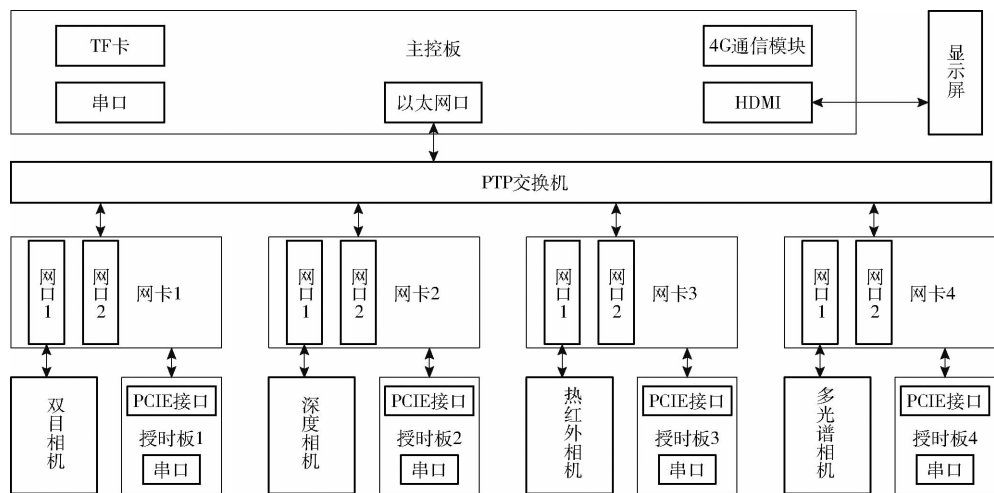


图 2 系统设计框图

Fig. 2 System design frame diagram

高德智感 IPT430M 型热红外传感器:同样垂直安装,负责作物温度的长期全自动监测,为干旱胁迫和病虫害实验提供数据支持^[20-22]。

奥比中光 Orbbec Astra 2 型深度相机同样为垂直向下的挂载方式,能够采集完整的作物三维模型,进而通过点云处理得到分枝结构、叶倾角分布等生物信息,为作物的形态学研究提供准确的数据集^[23-26]。

长光禹辰 MS400 型多光谱相机同样为垂直向下的挂载方式,通过捕捉植物在不同光谱波段的反射特征,监测作物健康、识别病虫害、评估生长状况,从而优化农业管理和提高产量^[27-29]。

1.2 PTP 协议应用

1.2.1 时间同步

时间同步在分布式系统上分为两种情况:绝对时间同步和相对时间同步。绝对时间同步依赖于外部时钟源。相较之下,相对时间同步并不依赖外部时钟源,而是通过使各节点的时钟同步到一个内部设定的时间基准上来实现^[30]。各时间同步方式特点见表 1。

表 1 各时间同步方法优缺点对比

Tab. 1 Comparison of advantages and disadvantages of various time synchronization methods

时间同步方式	优点	缺点	时间精度	同步方式
GNSS授时	同步精度高;不依赖于网络数据负载	价格昂贵;涉及国防安全	50 ns	绝对时间同步
NTP	不依赖于网络数据负载	时间精度低	50 ~ 200 ms	绝对、相对时间同步
PTP	时间精度高;不依赖于网络数据负载	节点都需要支持 PTP	20 ns	绝对、相对时间同步

考虑到本设计的应用环境为非结构化环境,无法确保全球导航卫星系统(Global navigation satellite system, GNSS)信号的稳定接收,同时 GNSS 设备成本较高,因而选择相对时间同步作为系统的时间同步方式。经过验证分析,这种同步方式不仅满足作物表型信息采集系统的精度要求并且降低了成本,还适应了具体的应用环境。使系统在满足采集需求的前提下,维持了较高的操作稳定性。

本系统结合应用环境、时间同步精度和成本的考量,选择 PTP 精确时间协议来实现时间同步。

1.2.2 PTP 协议时间同步原理

本系统基于 PTP 协议实现时间同步,其实现时间同步的原理是以主时钟作为整个 PTP 时钟域中的时间基准,主时钟与各从时钟间进行 PTP 报文的交互,同步原理图如图 3 所示。具体步骤为:

- (1)主时钟周期性地发出 Sync 报文,并记录下 Sync 报文离开主时钟的精确发送时间戳 T_1 ;从时钟记录 Sync 报文到达从时钟的精确到达时间戳 T_2 。
- (2)主时钟将精确发送时间戳 T_1 封装到 Follow_up 报文中,发送给从时钟。
- (3)从时钟发出 Delay_req 报文并且记录下精确发送时间戳 T_3 ;主时钟记录下 Delay_req 报文到达主时钟的精确到达时间戳 T_4 。
- (4)主时钟发出携带精确时间戳 T_4 的 Delay_resp 报文给从时钟。

上述步骤构成一个完整的工作周期。在每个工作周期结束后,从时钟会记录下 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 4 个精确的时间戳,这些时间戳用于计算报文传递过程中由于系统扰动和路径传输导致的总延迟及主从时钟之间的初始时间差,即时间偏移和路径时延。通过这些计算,实现了主时钟与从时钟的时间同步,从而实现动态地同步从时钟与主时钟的时间^[31]。

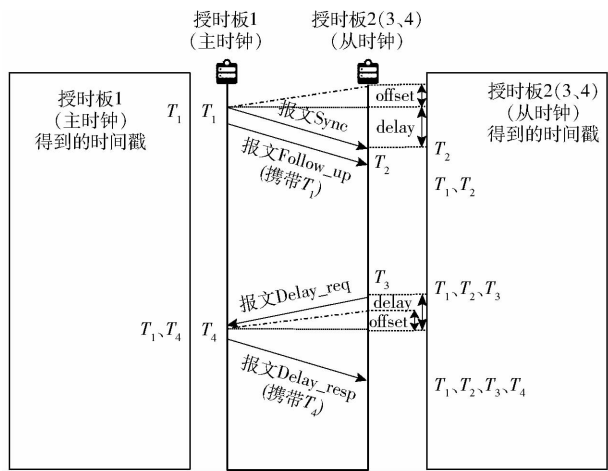


图 3 PTP 报文交互图

Fig. 3 PTP message interaction diagram

1.2.3 PTP 时间同步技术实现方案

本系统使用 LinuxPTP 软件包实现 PTP 协议。4 个授时板上电启动后,会自动运行 LinuxPTP 软件包中 ptp4l 和 phc2sys 程序。ptp4l 用于实现多设备间的 PTP 时钟同步,而 phc2sys 则负责单设备内 PTP 时钟与系统时钟的同步。具体时钟追随同步关系如图 4 所示。

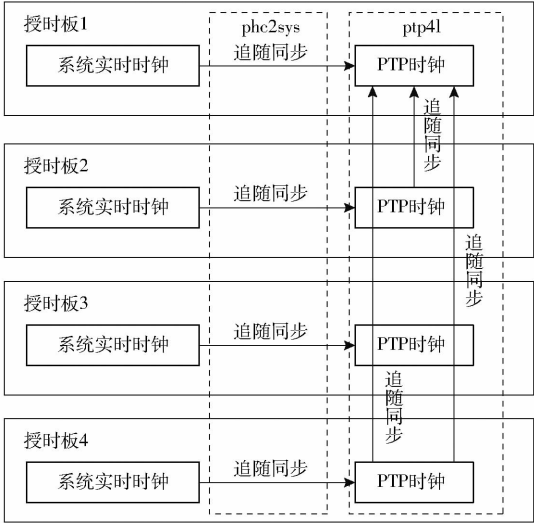


图 4 PTP 域内建立时钟关系与时钟追随同步关系流程图

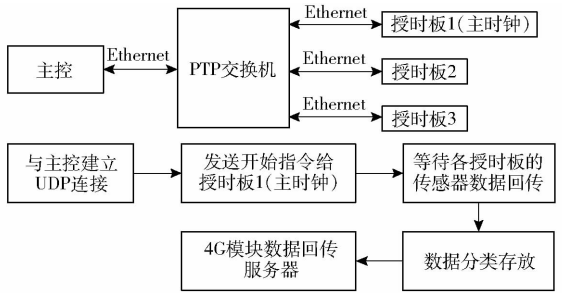
Fig. 4 Flowchart for establishing clock relationships and clock following synchronization relationships within the PTP domain

PTP 初始化时,需要确立主从时钟的关系,主时钟的选定是通过最佳主时钟算法 (Best master clock algorithm, BMCA) 来实现的^[32]。

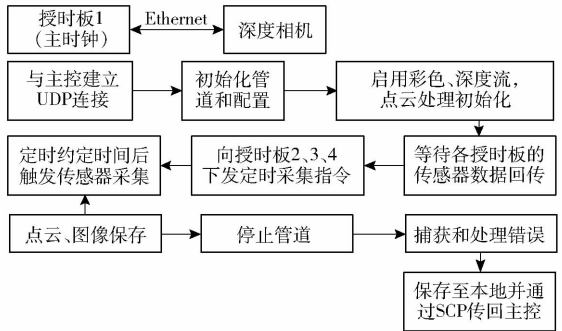
PTP 进入正常工作阶段时,授时板 2、3、4 - PTP 时钟以授时板 1 - PTP 时钟 (主时钟) 为时间基准并跟随同步,各授时板系统时钟追随同步各自设备内的 PTP 时钟,各授时板系统时钟以各自设备内的 PTP 时钟为中间媒介,最终达成了各授时板系统时钟与授时板 1 - PTP 时钟同步。

1.3 系统软件设计

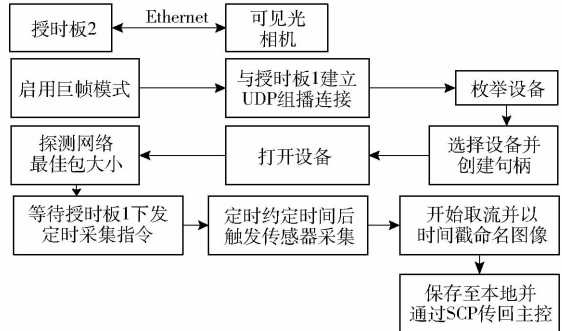
在 LinuxPTP 正常运行时,系统已建立完整的时钟同步关系,这为多传感器的同步采集提供了基础。系统的软件总体设计如图 5 所示。



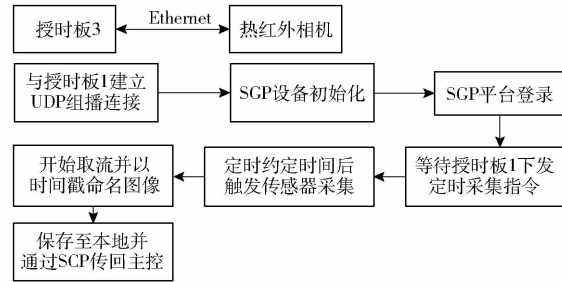
(a)



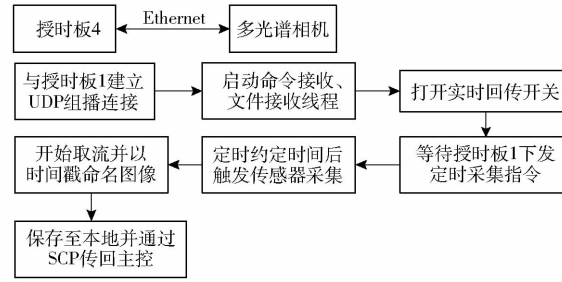
(b)



(c)



(d)



(e)

图 5 系统软件总体设计图

Fig. 5 Overall design diagrams of system software

其详细流程如下：

(1)主控制器指令下发

当主控制器接收到用户发出的开始指令后,通过用户数据报协议(User datagram protocol, UDP)将该指令发送给授时板 1,该授时板在系统中充当主时钟的角色。

(2)授时板 1 的时间戳记录与指令广播

授时板 1 在接收到开始指令后,即刻捕获当前系统时钟的时间戳(记为 RT1)。随后,利用 UDP 组播技术,将时间戳 RT1 与定时采集命令一同广播至授时板 2、3、4,以实现多个授时板的同步指令分发。

(3)授时板 1 的同步采集启动

授时板 1 采用 nanosleep 定时器设置 1 s 的延时,以确保所有授时板有足够的时间进行初始化和同步。延时结束后,触发传感器开始同步采集数据。

(4)授时板 2、3、4 的时间校准与数据采集

由于网络传输延迟和系统处理时间的差异,授时板 2、3、4 在接收到 RT1 时间戳和定时采集命令时,可能会存在时间同步误差。为了减少这种误差,授时板 2、3、4 在接收到指令的同时,分别记录各自

当前系统时钟的时间戳(分别为 RT2、RT3、RT4)。接着,各授时板通过计算时间差(即 RT1 与 RT2、RT3、RT4 之间的差值),并利用 nanosleep 定时器设置相应的补偿延时(计算公式为 $1 - (RT_i - RT_1)$),以调整各自的采集启动时间。补偿延时结束后,各授时板触发传感器进行数据采集。

(5)数据预处理与回传

采集完成后,各授时板对采集到的数据进行预处理,以便于后续分析。处理后的数据通过 UDP 协议回传至主控制器,以供进一步分析和决策支持。

2 时钟同步测试与分析

对 72 h 内各授时板系统时钟与其相应 PTP 时钟的时间误差、各 PTP 时钟之间的时间误差以及各授时板系统时钟与授时板 1 的 PTP 时钟之间时间误差进行统计分析,误差分布如图 6 所示。误差均方根(Root mean square, RMS)及长期抖动(Long term jitter, LTJ)结果见表 2。此外,图 7 展示了各授时板系统时钟与 PTP 时钟时间差值、PTP 时钟之间时间差值、各授时板系统时钟与授时板 1 的 PTP 时钟时间差值在 1 h 内的曲线。

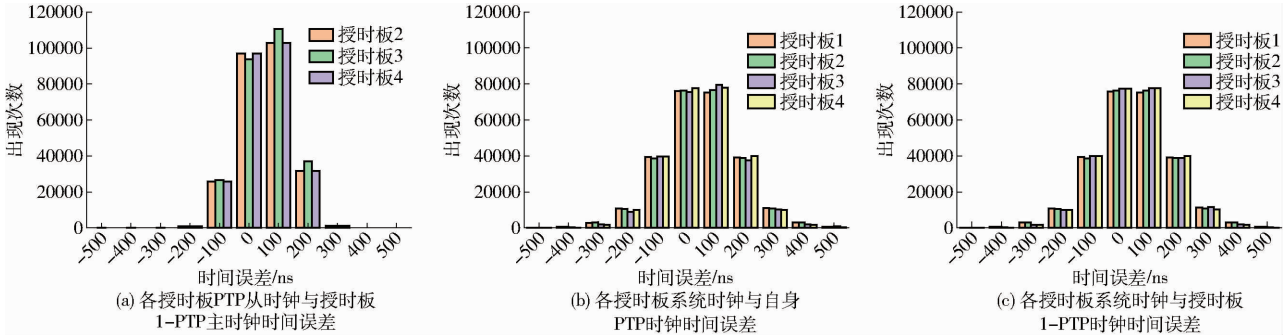


图 6 各类型时钟间的时间误差分布图

Fig. 6 Distribution diagram of time error between clocks

表 2 授时板各类时钟与不同时间基准的时间误差均方根和长期抖动			
Tab.2 RMS time errors and long-term jitter of various clocks on timing boards relative to different time references			
time references		ns	
时钟	时间基准	误差均方根	长期抖动
授时板 2-PTP 时钟	授时板 1-PTP 时钟	8	16
授时板 3-PTP 时钟	授时板 1-PTP 时钟	8	18
授时板 4-PTP 时钟	授时板 1-PTP 时钟	9	15
授时板 2-系统时钟	授时板 2-PTP 时钟	128	222
授时板 3-系统时钟	授时板 3-PTP 时钟	120	263
授时板 4-系统时钟	授时板 4-PTP 时钟	135	215
授时板 1-系统时钟	授时板 1-PTP 时钟	129	228
授时板 2-系统时钟	授时板 1-PTP 时钟	128	221
授时板 3-系统时钟	授时板 1-PTP 时钟	120	286
授时板 4-系统时钟	授时板 1-PTP 时钟	132	218

时间误差主要集中在 -100 ~ 200 ns 范围内,且呈现出一致的正向偏移,3 个传感器的读数高度一致,极端值出现的频率极低。系统时钟与授时板 1、2、3、4 对应的 PTP 时钟之间时间误差也主要集中在 -100 ~ 200 ns 内,尤其在 -100 ~ 0 ns 和 0 ~ 100 ns 两个区间内频数最高。各授时板的系统时钟与授时板 1 (PTP 主时钟) 之间的时间误差同样集中在 -100 ~ 200 ns 区间,尤其在 -100 ~ 0 ns 和 0 ~ 100 ns 区间内表现尤为显著,4 个传感器的读数总体一致,仅在极端值上存在少许差异。数据在中间范围内高度集中,极端值出现频率极低。

测试结果表明,该系统在 72 h 内能够正常实现时间同步,各授时板系统时钟与授时板 1 的 PTP 时钟(主时钟)之间时间误差的均方根分别为 129、128、120、132 ns,长期抖动分别为 12、221、286、

授时板 2、3、4 与授时板 1 (PTP 主时钟) 之间的

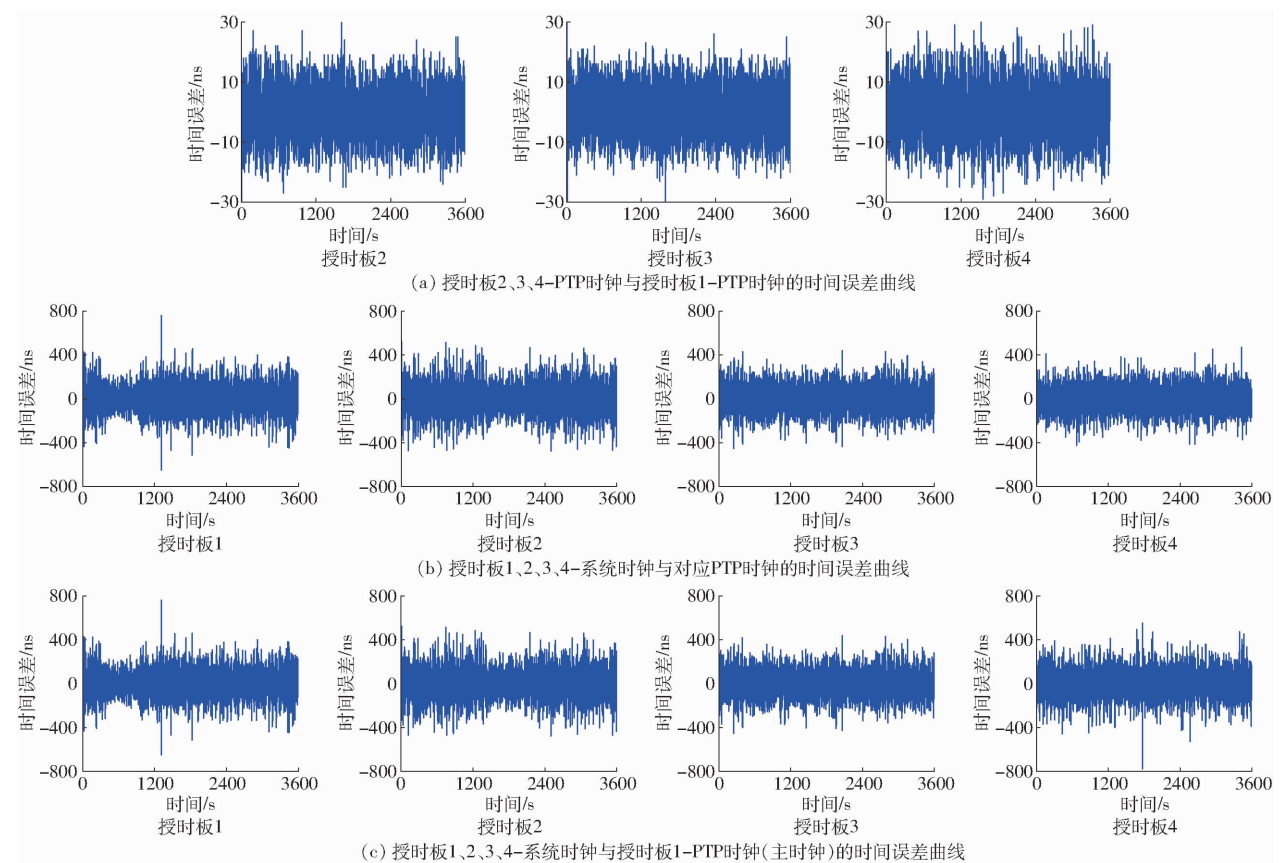


图 7 各类型时钟间的时间误差曲线

Fig. 7 Time error curves between different types of clocks

218 ns, 证明了该系统能够实现较高的时间同步精度。

3 作物表型信息采集系统性能测试

本系统应用于复杂的农田环境中, 外部干扰因素众多, 且需要在高强度的工作条件下运行, 因此系统的稳定性和动态性能尤为重要。为验证和分析本系统在实际应用中的采集稳定性和动态性能, 设计并实施田间试验。

田间试验地点位于北京市昌平区国家精准农业研究基地, 试验对象为 100 株盆栽种植的国福 909 辣椒。试验设备与辣椒盆栽的布置如图 8 所示。对这 100 株盆栽辣椒进行了作物表型信息的采集, 每株采集一次, 共进行 100 次采集操作。每次采集过程中, 记录其采集成功率、各授时板同步触发采集的时间误差和系统响应时间, 以此评估系统在实际应用中的性能。

3.1 系统稳定性分析

在进行系统性能评估的过程中, 采用量化的指标和方法, 以确保评估结果的客观性和准确性。设定了在不超过 900 s 的时间内完成 100 株盆栽种植的国福 909 辣椒的采集任务, 每株盆栽的采集时间间隔设定为 5 s。试验数据涵盖了所有传感器的



图 8 辣椒盆栽

Fig. 8 Capsicum potting

数据以及系统响应时间, 旨在全面评估系统的稳定性和响应效率。

试验结果表明, 系统成功地完成了 100 次辣椒盆栽的采集任务, 系统平均响应时间为 2.18 s, 其中最大响应时间为 2.28 s, 最小响应时间为 2.12 s。整个采集过程, 包括每次采集后的间隔时间 5 s, 总共消耗了 732.13 s。每次数据同步采集均成功, 并且图像按照预设的类别进行了存储。

为了直观展示试验结果, 100 次采集过程中系统响应时间的散点图如图 9 所示, 而图 10 展示了 10 组辣椒作物的表型数据。进一步证实了系统在连续采集任务中的稳定性和可靠性。系统在规定的时间内完成了所有采集任务, 可见响应时间的波动范围较小, 表明系统在实际操作中表现出了

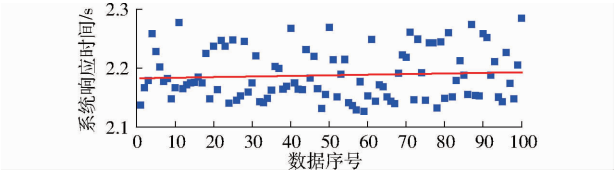


图 9 系统响应时间散点图

Fig. 9 Scatter plot of system response time

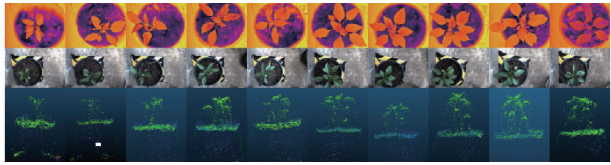


图 10 10 组辣椒作物表型数据

Fig. 10 Ten groups of capsicum crop phenotypic data

良好的稳定性和连续采集能力,满足了系统设计的需求。

3.2 各授时板同步触发采集时间误差

各授时板的同步触发采集时间误差由 3 部分构成:系统时钟与 PTP 时钟之间的同步误差,PTP 时钟之间的相对误差,以及定时器引发的系统误差。前两者已在前文中分析得出结论:以授时板 1 的 PTP 时钟为参考,各授时板系统时钟相对于授时板 1 - PTP 时钟的时间误差均方根均小于 130 ns,长期抖动不超过 286 ns。定时器误差源于中断延迟、软件延迟和时钟漂移等系统内在因素。为进一步量化多授时板同步触发的采集时间误差,设计了一项高强度试验,对 100 株国福 909 辣椒进行连续的表型信息采集,累计采集 100 次。在相同条件下,记录每次多授时板同步触发的时间误差。图 11 为各授时板 100 次触发采集的时间误差分布。

对多授时板同步触发采集时间误差进行统计分析,结果如表 3 所示。分析表明,定时器产生的误差均方根在 300 μs 以内,最大误差为 700.510 μs,最小误差低至 84.221 μs。

结合系统时钟与 PTP 时钟之间的时间误差、PTP 时钟之间的时间误差以及定时器产生的时间误

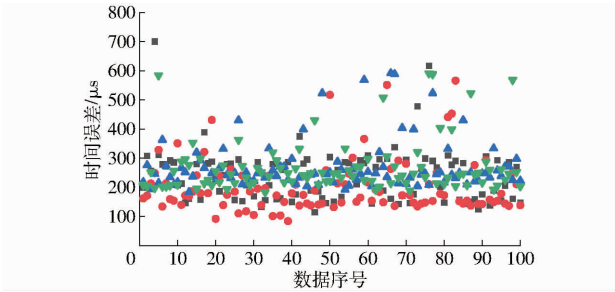


图 11 各个授时板触发采集的时间误差散点图

Fig. 11 Scatter plot of time error triggered by various timing boards for collection

表 3 多授时板同步触发采集时间误差

Tab.3 Time error generated by timers on each

timing board			μs
授时板编号	均方根	最大值	最小值
1	299.204	591.332	183.283
2	255.700	700.510	114.700
3	223.224	565.954	84.221
3	236.166	589.261	86.222

差数据分析表明,每次触发采集的时间误差均控制在 700.510 μs 以内,系统表现出良好的动态性能,能够满足实际高速采集的需求。

4 结论

(1) 本文采用具有独立知识产权的国产设备,搭建了作物表型信息同步采集系统,针对多传感器时间同步问题展开研究。

(2) 该系统在 72 h 内时间同步正常,且各授时板系统时钟与授时板 1 - PTP 时钟(主时钟)时间误差均方根在 132 ns 内,长期抖动不超过 286 ns,实现较高时间同步精度。

(3) 经验证试验表明本作物表型信息采集系统能连续采集表型信息,满足稳定且连续采集的需求。

(4) 验证试验表明系统中各授时板同步触发采集时间误差保持在 1 ms 以内,满足多传感器同步性要求。

参 考 文 献

[1] 赵春江. 植物表型组学大数据及其研究进展[J]. 农业大数据学报,2019,1(2):5-18.
ZHAO Chunjiang. Big data of plant phenomic and its research progress[J]. Journal of Agricultural Big Data,2019,1(2):5-18. (in Chinese)

[2] 程曼,袁洪波,蔡振江,等. 田间作物高通量表型信息获取与分析技术研究进展[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊1):314-324.
CHENG Man, YUAN Hongbo, CAI Zhenjiang, et al. Review of field-based information acquisition and analysis of high-throughput phenotyping[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(Supp.1):314-324. (in Chinese)

[3] 穆金虎,陈玉泽,冯慧,等. 作物育种学领域新的革命:高通量的表型组学时代[J]. 植物科学学报,2016,34(6):962-971.
MU Jinhu, CHEN Yuze, FENG Hui, et al. A new revolution in crop breeding: the era of high-throughput phenomics[J]. Plant Science Journal,2016,34(6):962-971. (in Chinese)

[4] 何勇,李禧尧,杨国峰,等.室内高通量种质资源表型平台研究进展与展望[J].农业工程学报,2022,38(17):127–141.
HE Yong,LI Xiyao,YANG Guofeng,et al. Research progress and prospect of indoor high-throughput germplasm phenotyping platforms[J]. Transactions of the CSAE,2022,38(17):127–141. (in Chinese)

[5] NINOMIYA S, BARET F, CHENG Z M. Plant phenomics: emerging transdisciplinary science [J]. Plant Phenomics,2019,1(1):39–41.

[6] 王薇,付虹雨,龚喜红,等.高通量表型技术在作物干旱胁迫中的应用研究进展[J].节水灌溉,2023(7):110–116,124.
WANG Wei,FU Hongyu,GONG Xihong,et al. Research progress of the application of high-throughput phenotypic technology in crop drought stress[J]. Water Saving Irrigation,2023(7):110–116,124. (in Chinese)

[7] 张刚,王宇,杨宇航,等.桁架式农田高通量信息远程采集平台设计与试验[J].农业工程学报,2024,40(7):93–103.
ZHANG Gang,WANG Yu,YANG Yuhang,et al. Design and experiment of the truss-type platform to acquire high-throughput information from farmland using remote sensing[J]. Transactions of the CSAE,2024,40(7):93–103. (in Chinese)

[8] 温维亮,郭新宇,张颖,等.作物表型组大数据技术及装备发展研究[J].中国工程科学,2023,25(4):227–238.
WEN Weiliang,GUO Xinyu,ZHANG Ying,et al. Technology and equipment of big data on crop phenomics[J]. Strategic Study of CAE,2023,25(4):227–238. (in Chinese)

[9] 宋俊男,朱世强,原崧育,等.地外探测设备多传感器硬件时间同步方法研究[J].空间控制技术与应用,2021,47(6):19–26.
SONG Junnan,ZHU Shiqiang,YUAN Songyu,et al. Research on hardware time synchronization of multiple sensors for extraterrestrial detection equipment[J]. Space Control Technology and Application,2021,47(6):19–26. (in Chinese)

[10] TSCHOPP F, RINER M, FEHR M, et al. VersaVIS: an open versatile multi-camera visual-inertial sensor suite[J]. Sensors,2019,20(5):1439.

[11] 俞晨.邻居信息感知的工业无线传感器网络安全时间同步方法研究[D].镇江:江苏大学,2024.
YU Chen. Neighbor information sensing based secure time synchronization in industrial wireless sensor networks [D]. Zhenjiang:Jiangsu University,2024. (in Chinese)

[12] 李彩华,滕云田,周健超,等.分布式地震数据采集器的高精度时间同步系统研制[J].地震学报,2022,44(6):1111–1120.
LI Caihua,TENG Yuntian,ZHOU Jianchao,et al. Design on high-precision time-synchronization system for distributed seismic data acquisition[J]. Acta Seismologica Sinica,2022,44(6):1111–1120. (in Chinese)

[13] 李雄伟,季钰林,谢伊亮,等.基于IEEE1588时间同步的分布式桥梁健康监测系统[J].电子测试,2021(8):5–9.
LI Xiongwei,JI Yulin,XIE Yiliang,et al. Distributed bridge monitoring system based on high precision time synchronization protocol IEEE1588[J]. Electronic Test,2021(8):5–9. (in Chinese)

[14] 单飞桥,王照伟,沈跃.基于精确时间协议的工业无线传感器网络时间同步方法[J].计算机应用,2023,43(7):2255–2260.
SHAN Feiqiao,WANG Zhaowei,SHEN Yue. Time synchronization method based on precision time protocol in industrial wireless sensor networks[J]. Journal of Computer Applications,2023,43(7):2255–2260. (in Chinese)

[15] FERRARI P, FLAMMINI A, MARIOLI D, et al. IEEE 1588-based synchronization system for a displacement sensor network [C]//IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference,2007:254–260.

[16] 郭庆华,吴芳芳,庞树鑫,等.Crop 3D——基于激光雷达技术的作物高通量三维表型测量平台[J].中国科学:生命科学,2016,46(10):1210–1221.
GUO Qinghua,WU Fangfang,PANG Shuxin,et al. Crop 3D: a platform based on LiDAR for 3D high-throughput crop phenotyping[J]. Sci. Sin. Vitae.,2016,46:1210–1221. (in Chinese)

[17] 张慧春,王国苏,边黎明,等.基于光学相机的植物表型测量系统与时序生长模型研究[J].农业机械学报,2019,50(10):197–207.
ZHANG Huichun,WANG Guosu,BIAN Liming,et al. Visible camera-based 3D phenotype measurement system and time-series visual growth model of plant[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(10):197–207. (in Chinese)

[18] 王传宇,郭新宇,杜建军,等.基于时间序列图像的玉米植株干旱胁迫表型检测方法[J].农业工程学报,2016,32(21):189–195.
WANG Chuanyu,GUO Xinyu,DU Jianjun,et al. Maize plant drought stress phenotype testing method based on time-series images[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(21):189–195. (in Chinese)

[19] WU S, WEN W, WANG Y, et al. MVS-Pheno: a portable and low-cost phenotyping platform for maize shoots using multiview stereo 3D reconstruction[J]. Plant Phenomics,2020,2(1):40–56.

[20] FAN J C, LI Y L, YU S, et al. Application of internet of things to agriculture—the LQ-fieldpheno platform: a high-throughput platform for obtaining crop phenotypes in field[J]. Research,2023,6:0059.

[21] 张慧春,杨琨琪,李杨先,等.面向植物抗旱性研究的多源表型信息采集和分析技术[J].农业机械学报,2022,53(2):203–211.
ZHANG Huichun,YANG Kunqi,LI Yangxian,et al. Multi-source phenotypic information collection and analysis techniques

- for drought resistance of plants[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(2): 203 – 211. (in Chinese)
- [22] 张慧春,周子阳,边黎明,等. 基于 1DCNN 融合多源表型数据的杨树干旱胁迫评估方法[J]. 农业机械学报,2024,55(9):286 – 296.
ZHANG Huichun, ZHOU Ziyang, BIAN Liming, et al. Assessment of poplar drought stress level based on 1DCNN fusion of multi-source phenotypic data[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(9): 286 – 296. (in Chinese)
- [23] 仇瑞承,苗艳龙,季宇寒,等. 基于 RGB – D 相机的单株玉米株高测量方法[J]. 农业机械学报,2017,48(增刊):211 – 219.
QIU Ruicheng, MIAO Yanlong, JI Yuhua, et al. Measurement of individual maize height based on RGB – D camera[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(Supp.): 211 – 219. (in Chinese)
- [24] 江庆,安东,韩华宇,等. 基于激光雷达与 RGB 相机融合的玉米作物行检测算法研究[J]. 农业机械学报,2024,55(10): 263 – 274.
JIANG Qing, AN Dong, HAN Huayu, et al. Maize crop row detection algorithm based on fusion of LiDAR and RGB camera[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(10): 263 – 274. (in Chinese)
- [25] 李秋洁,丁莉. 基于移动多线激光雷达扫描的树冠叶面积估计方法[J]. 农业机械学报,2024,55(9):308 – 315,480.
LI Qiuji, DING Li. Crown leaf area estimation based on mobile multi-layer LiDAR scanning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(9): 308 – 315,480. (in Chinese)
- [26] 劳彩莲,杨瀚,李鹏,等. 基于消费级深度相机的玉米植株三维重建[J]. 农业机械学报,2019,50(7):222 – 228.
LAO Cailian, YANG Han, LI Peng, et al. 3D reconstruction of maize plants based on consumer depth camera[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(7): 222 – 228. (in Chinese)
- [27] 赵经华,马世骅,房城泰. 基于熵权-模糊综合评价法的无人机多光谱春玉米长势监测模型研究[J]. 农业机械学报,2024,55(8):214 – 224.
ZHAO Jinghua, MA Shijiao, FANG Chengtai. Growth monitoring of spring maize using UAV multispectral imaging based on entropy weight – fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(8): 214 – 224. (in Chinese)
- [28] 李晓丽,魏玉震,徐劼,等. 基于高光谱成像的茶叶中 EGCG 分布可视化[J]. 农业工程学报,2018,34(7):180 – 186.
LI Xiaoli, WEI Yuzhen, XU Jie, et al. EGCG distribution visualization in tea leaves based on hyperspectral imaging technology[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(7): 180 – 186. (in Chinese)
- [29] 万亮,杜晓月,陈硕博,等. 基于无人机多源图谱融合的水稻稻穗表型监测[J]. 农业工程学报,2022,38(9):162 – 170.
WAN Liang, DU Xiaoyue, CHEN Shuobo, et al. Rice panicle phenotyping using UAV-based multi-source spectral image data fusion[J]. Transactions of the CSAE, 2022,38(9): 162 – 170. (in Chinese)
- [30] 许龙霞,刘娅,李孝辉. GNSS 授时与时间同步在基础设施行业的应用[J]. 航空学报,2024,45(增刊):730567.
XU Longxia, LIU Ya, LI Xiaohui. Application of GNSS timing and time synchronization in the infrastructure industry[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024,45(Supp.): 730567. (in Chinese)
- [31] 王悦颖. 基于 BP 神经网络的 PTP 时间同步算法研究[D]. 长春:吉林大学,2024.
WANG Yueying. Research on PTP time synchronization algorithm based on BP neural network[D]. Changchun: Jilin University, 2024. (in Chinese)
- [32] 朱海龙,严园园. TSN 网络中时钟同步可靠性提升方法[J]. 北京邮电大学学报,2021,44(2):20 – 25,46.
ZHU Hailong, YAN Yuanyuan. Measures of reliability improvement of clock synchronization in time sensitive networking[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021,44(2): 20 – 25,46. (in Chinese)