

面向海参养殖的物理信息融合系统*

杜晓舟^{1,3}, 贾兵², 乔建忠¹, 林树宽¹

¹(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

²(水下测控技术重点实验室, 辽宁 大连 116013)

³(总参通信工程设计研究院, 辽宁 沈阳 110005)

通讯作者: 杜晓舟, E-mail: duxiaozhou.neu@gmail.com; 乔建忠, E-mail: qiaojianzhong@ise.neu.edu.cn

摘要: 国际海参养殖业一直采用传统的人工生产方式, 存在工艺落后、效率低下的严重问题, 无法满足迅速增长的市场需求. 针对这一问题, 将 CPS 思想引入水产领域, 详细分析了 CPS 的理论特点和实际意义, 并根据 CPS 体系结构设计了一种海参养殖的物理信息融合系统, 包括环境监测子系统、信息处理传输子系统、过程控制子系统和远程决策控制中心等 4 部分. 针对物理与信息过程交互的特点, 采用自动机理论对物理过程建模并加以验证, 以确保整体系统组构的可靠性. 该系统的主要部分已经完成部署, 实际观测数据表明, 其能够有效完成海参养殖的监控功能. 系统还具有良好的扩展性, 通过与领域专家的深入合作, 还可将该系统推广到更广泛的水环境应用领域.

关键词: 信息物理融合系统; 海参养殖; 系统设计; 水环境监控; 自动机模型

中文引用格式: 杜晓舟, 贾兵, 乔建忠, 林树宽. 面向海参养殖的物理信息融合系统. 软件学报, 2013, 24(Suppl. (1)): 41-50. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13006.htm>

英文引用格式: Du XZ, Jia B, Qiao JZ, Lin SK. Sea cucumber oriented cyber physical systems. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2013, 24(Suppl. (1)): 41-50 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13006.htm>

Sea Cucumber Oriented Cyber Physical Systems

DU Xiao-Zhou^{1,3}, JIA Bing², QIAO Jian-Zhong¹, LIN Shu-Kuan¹

¹(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

²(Science and Technology on Underwater Test and Control Laboratory, Dalian 116013, China)

³(Communication Engineering Design and Research Institute of the General Staff of PLA, Shenyang 110005, China)

Corresponding author: DU Xiao-Zhou, E-mail: duxiaozhou.neu@gmail.com;

QIAO Jian-Zhong, E-mail: qiaojianzhong@ise.neu.edu.cn

Abstract: Traditionally, sea cucumber production relies heavily on human labors which results in low production efficiency and inability to meet the demands of a rapidly growing market. To address this problem, this paper brings the idea of cyber physical systems (CPS) into aquatic areas. This paper provide a detailed analysis of the theory and characteristics of CPS along with its practical significance, and construct a physical information fusion system for sea cucumber production. The system is designed according to the CPS architecture, which includes the environmental monitoring subsystem, the information processing and transmission subsystem, the process control subsystem and the remote control center. In accordance with the characteristics of interaction between physics and information, this paper models and verifies the physical process by using the theory of automata, which ensures the reliability of the overall system. The deployment of the main parts of the system has been completed. The observation data indicates that, the system can be used to effectively monitor sea cucumber production. The system also has good scalability. Through in-depth cooperation with experts in the field, we believe it can be extended to be used in many other applications in water environment.

Key words: CPS; sea cucumber breeding; system design; water environment monitoring; automata model

* 基金项目: 国家自然科学基金(61272177)

收稿时间: 2013-05-02; 定稿时间: 2013-08-22

1 海参养殖现状

海参(Sea Cucumber, Holothurians)属棘皮动物门(Echinodermata)海参纲(Holothuroidea).在中国,海参一直是珍贵的食品和药品来源.海参位列中国传统四大美味之首,500年前的中国明朝《本草纲目》即有关于海参医用功效的记载.现代研究也表明,海参营养价值极高,其蛋白质脂肪比远高于包括鱼类等海产品在内的其他食品.海参全体组织均含有丰富的生物活性物质,具有非常显著的药理活性作用.因此,近年来海参需求量逐年显著跃升,经济价值明显^[1].

海参获取方法一般分为自然捕捞和人工养殖两种.因为需求量的剧增,海参自然捕捞量逐年下降且种群退化严重,甚至有些国家已经开始执行海参捕捞限制性保护政策.因此,提高海参养殖产量而减少对自然的破坏性捕捞是海参产业的必然发展趋势,而如何切实提高海参人工养殖水平是解决问题的关键.中国人工养殖海参的历史可以追溯到1000年前,始终保持着世界上最主要海参消费国和产出国的地位.在我国开展海参养殖的相关研究工作,不但具备丰富充足的科研实践条件,还可以带来显著的社会经济效益^[2].

海参养殖属海珍品养殖,与普通鱼类养殖方法差异性很大.根据海参成长过程,一般将海参人工养殖技术划分为苗种培育和养成增殖两个阶段.经过近30年的发展,国际上主要海参产区的苗种培育阶段的工艺流程都已渐趋成熟,在我国已经形成海参苗种工厂化量产的局面.但海参养成增殖技术还处于多种养殖方法并存的阶段,根据养殖场地和技术可以分为以下几类:近海池塘或围堰养殖、浅海放流增殖、海上箱笼养殖方法等^[3].

几种养成增殖方法的特点比较见表1.前两种方法都属于传统养殖方法,箱笼养殖属于近年来的新兴方法.在深海流动水体中养殖海产品具有极佳的环境优势,国际上在鱼类养殖领域中已经成为主流的养殖方式,在我国也需要将海参的箱笼养殖方法做进一步完善和推广.

Table 1 Comparison of sea cucumber farming methods

表1 海参养殖方法比较

海参养殖方法	养殖场地	成本	方法评价
池塘/围堰养殖	近海岸边	设施相对简单,成本较低	养殖设施和环境差,产量有限,产品质量低
放流增殖	浅海人工礁石	造礁成本高	范围有限,环境动荡,不易控制养殖过程,回捕率低,且易受近海水体污染影响
箱笼养殖	深海远海区域	成本适中	水体环境优越,回捕率高,还可以实现季节性多轮养殖

长期以来,我国水产养殖业一直存在推广速度过快,理论研究滞后,运作不规范等诸多严重问题,尤其是基础设施和养殖工艺落后是制约水产养殖业规范有序发展的最大因素.国际上,采用信息化技术对养殖环境和方法进行合理高效的监控已经是主流手段,在挪威等水产养殖发达国家,有成规模的大型信息化海上养殖基地,单体鱼箱产量可以达到千吨,经济效益效果十分可观.在我国,包括海参养殖业在内的水产业,还处在基础设施简单且仅靠人工手段完成养殖过程的粗放型生产阶段,面临着投入高,风险高,人力高,但产出不稳定的严峻局面,迫切需要凭借信息技术实现一个可以对养殖全过程做到实时感知、全面互联和准确反馈的物理信息融合系统(cyber physical system,简称CPS).

2 信息物理融合系统(CPS)研究

信息物理融合系统这一名词出现于2006年,由美国国家自然科学基金会的Gill提出,意指信息空间(cyberspace)与物理过程(physical process)的深度融合^[4].其更早的来源则是Wiener于20世纪40年代提出的“控制论(cybernetics)”一词^[5].控制论是集自动控制、通信、电子技术、生理学、心理学、医学、数学、计算机技术和统计力学等多种学科门类融合的产物,其与系统论、信息论共同被视为现代信息技术的理论基础.因此,CPS在概念起源上就充分体现了物理过程与信息空间紧密融合的思想.

与CPS接近的概念还有物联网(internet of things,简称IoT)一词,强调基于互联网、传统电信网等信息载体搭建的网络,让所有能够被独立寻址的普通物理对象实现互联互通的功能.两者虽然着眼点不同,但都意图关注并解决物理世界与信息世界深度融合的问题^[6].

CPS的理论意义在于,其明确指出了已有理论和技术在实现物理世界和信息世界深度融合时面临的关键问题是两者研究领域长期分离不匹配的问题.物理过程是连续的,并发的,时间敏感的;而计算过程是离散的,非并发的,甚至人为忽略时间属性的.正是由于这两类过程属性的客观差异性,再加上长期以来研究方法的主观局限性,造成当前物理过程和信息过程融合难度较大.如:在传统计算中关注的目标是系统通用计算的平均性能提升,甚至连时间因素在计算机体系的层次抽象中都被人为忽略了;而嵌入式计算领域主要研究的是资源有限性问题,两者都没有对物理信息过程融合的问题给予足够关注.而对这种动态融合(joint dynamics)问题的考虑都体现在CPS的相关研究中^[7,8].

根据我们的研究与实践,CPS的关键属性与系统特征对应关系可以归纳为以下几点:

(1) 物联性与实时性.在CPS中,信息系统的交互对象是物理过程,物理过程具有实时性、并发性等特点,系统的计算行为必须满足实时约束,所以物联性特点对应系统的实时性特征.

(2) 互联性与兼容性.CPS中系统组件众多,大多属于分布式系统,有时还需要与其他系统进行必要的信息互通和功能互操作,因此要求系统具有兼容性,可以提供标准接口并支持多种通信协议来保证组件和系统间的互联性.

(3) 智联性与反馈性.CPS中不但要通过全面感知获取物理数据,更要感知信息的基础上实现智能分析和决策反馈.CPS中物理过程的智能反馈不只体现在系统局部的直接反馈控制上,更体现在系统在综合了系统内其它部件以及其他系统的必要信息来实现的全局反馈功能上.

CPS的主要技术包括以计算、控制、通信(computer control and communication,简称3C)为代表的多领域理论知识.CPS的属性、特征和技术关系如图1所示.

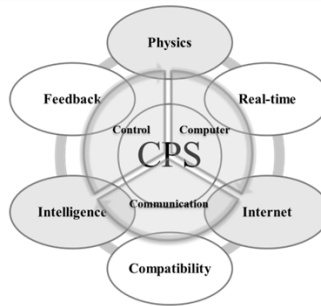


Fig.1 Attributes, characteristics and techniques of CPS

图1 CPS的关键属性,系统特征和主要技术

依据系统分层原理,结合我们项目实施中的体会,给出CPS体系结构图如图2所示.

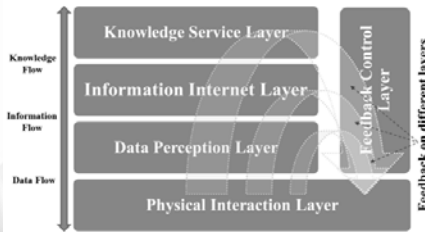


Fig.2 Architecture of CPS

图2 CPS体系结构图

物理交互层(physical interaction layer).

位于CPS体系结构最底层,由包括CPS节点在内的大量物理信息设施组成.该层直接与物理系统交互,功能包括采集物理数据并向上传送,以及接受上层反馈数据对物理设备进行相应控制等.

在本系统中,该层包含了许多海洋专用传感器和视频影像设备,还有对养殖箱体进行控制的物理设备等.

数据感知层(data perception layer).

负责下层传感数据的局部汇集和分析整理,通过与反馈控制层交互完成系统的局部反馈控制功能.

在本系统中,我们设计了面向 CPS 应用的专用节点操作系统部署在 CPS 节点上,以保证系统实时完成数据采集上传,局部分析和反馈控制等功能,满足 CPS 的物联网性要求^[9].

信息互联层(information internet layer).

保证系统各分层纵向间信息互通,包括汇总各数据感知子系统的传感数据提供给上层应用,以及将上层的控制数据准确无误地发送到各下层级系统中,同时还要保证与其他信息系统的横向间互连.如本系统需要与公共气象服务平台连通,实现海洋气象信息的双向传输,以保证系统实现更全面准确的感知和控制功能.CPS 中各子系统交互的数据在格式、类型和属性上差异巨大,本层除了要实现较好的兼容性外,还包含了一个从原始数据到价值信息的遴选过程,要完成初步的信息清洗、信息融合和信息处理等方面功能.

知识服务层(knowledge service layer).

信息系统对物理世界的全面感知和准确反馈需要通过本层功能来实现.本层是 CPS 信息汇聚的中心,通过对信息的全面整合得出正确的理解和分析,进而实现全局反馈的功能.同时,该层还应该为 CPS 之上的其他应用程序提供相应的服务接口,如本系统中还将提供为海产品销售服务的物流追踪和电子商务等相关功能,这些都需要在知识服务层实现相应的接口支持.

反馈控制层(feedback control layer).

与物理世界的交互是双向的,准确的物理感知是交互的前提,实时的物理反馈是交互的目的.CPS 通过反馈控制层中相应的物理控制系统实现反馈功能.这种反馈功能包括局部反馈和全局反馈两种,如在本养殖系统中,CPS 节点根据温度传感器获取的水温信息直接调整箱体温度属于局部反馈功能,而获取到公共气象服务中关于未来气象温度变化的信息而预先做出箱体温度的预测性控制就属于综合了其他系统有效知识的全局反馈功能.

3 国内外相关研究现状

一般认为,CPS 是由移动自组织网络(mobile ad hoc network,简称 MANET)和无线传感网(wireless sensor network,简称 WSN)/WSAN(wireless sensor actuator network,简称 WSAN)等技术发展而来,并将 WSN 看作是 CPS 感知层的技术基础^[10].WSN 概念提出后,国内外都进行了大量的理论和应用研究,具体围绕着低耗自组、异构互联和泛在协同等科学问题展开,涉及到能耗、计算、通信、存储等诸多方面^[11,12].并将研究和实践范围拓展到水下传感网领域^[13-16].

国内在传感网应用领域取得了一些突出性的成果,包括陆地上的森林环境^[17]、煤矿安全监控^[18]等,以及海洋领域^[19]的传感器、网络协议和数据管理等诸多方面.国外的水产养殖业比较重视利用信息技术提高养殖效率和收益,进行了大量的研究和实践,在鱼箱养殖实践上效果显著^[20,21].但由于饮食和历史习惯的原因,国外对于海参等海珍品的大规模需求还没有被挖掘出来,对于这类水产品的关注很少.中国是传统的水产养殖大国,在鱼类和海珍品养殖领域具有比较悠久的历史,但长期停留在依赖人工粗放低效的养殖技术水平上.近些年来,国内也开始注意采用信息技术来提高水产品养殖的产量和效率.包括将 WSN 技术应用于水产养殖业的一些尝试,但大都集中于单纯获取养殖环境的传感数据上^[22,23].

针对 CPS 国内外也开展了一系列理论和应用研究,主要围绕计算、通信和控制这 3 个领域,涉及系统建模、数据处理、能耗管理、软件设计、反馈控制、系统集成等诸多方面,应用案例涵盖电网、交通、环境和医疗等多种领域^[24-26].目前在国内外水产养殖领域,未见将包括反馈控制在内的 CPS 完整理论应用的相关研究成果报道.而全面感知和获取养殖环境数据尝试的根本目的正在于准确、科学、实时、有效地反馈控制养殖环境,减少人工劳动的强度的同时大幅提高水产品产量.另外,针对海参养殖环境进行 CPS 相关的理论研究和系统设计,也可以扩展 CPS 应用的领域和范围,将为 CPS 理论研究提供新的平台和更广阔的视角.

4 海参养殖系统研究与设计

4.1 总体设计

根据 CPS 体系结构和海参箱体养殖技术的特点,系统划分为 4 个部分,分别是:环境监测子系统、信息处理传输子系统、过程控制子系统和远程决策控制中心,如图 3 所示。

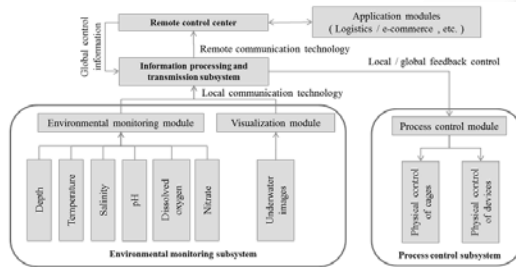


Fig.3 Sea cucumber aquaculture system structure diagram

图 3 海参养殖系统结构关系图

所有的海上节点系统都使用浮标搭载,保证海中悬浮位置相对固定,如图 4 所示。节点电子设备主要安装在浮标体下方的电子舱中,传感器探头则直接暴露在海洋环境中,采取水下物理感知水上数据传输的传感通信模式。

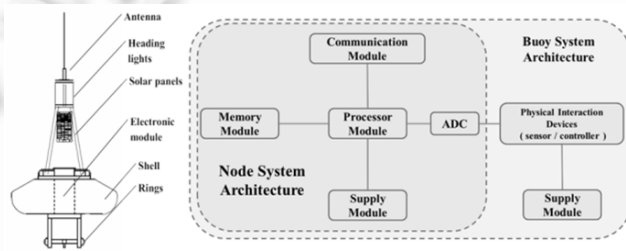


Fig.4 Buoy node structure diagram

图 4 浮标节点结构图

4.2 环境监测子系统

环境理化参数和海参生长状态是系统监测的主要内容,尤其是前者,海参生长环境的理化参数是决定海参养殖效果的决定性因素,必须进行全面的实时的监测。

系统监测的理化参数包括深度、温度、盐度、PH 值、溶解氧和硝酸盐浓度这 6 种类型。系统中集成了温盐深仪、海洋酸碱度仪(即 PH 计)、溶解氧仪和硝酸盐仪这 4 种传感测量设备来感知相应参数。海参生长状态和环境的监测我们通过部署的水下节点摄像机来实现。这些设备的样式和参数如图 5 所示。


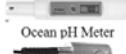



	Parameters	Range	Accuracy
	CTD System		
	Temperature	-5°C~+35°C	±0.002°C
	Conductivity(Salinity)	0~70mS/cm	±0.01mS/cm
	Pressure(Depth)	0~200bar	±0.1%FS
	pH	2~12pH	0.1
	Dissolved oxygen	0~120%	5%
	Nitrate	0.007~56mg/l- N*(0.5~4000µM)	Reading±10%
	Underwater camera	440 TV lines, sensitivity 0.02Lux, standard lens 4.2-42mm, automatic aperture, 10x optical zoom	

Fig.5 Underwater sensor parameters

图 5 水下传感器参数图

系统节点组织方式采用主从节点设计,环境监测子系统的理化传感器集成节点和摄像机节点是两种不同类型的从节点.通信方式也采用两种不同模式.传感器和摄像机的能耗都比较大,采用单独的太阳能充电电池供电.

理化传感器集成节点采用局域通信技术,通过 Zigbee 协议将采集数据直接发送给信息处理传输子系统中的主节点,由主节点进行数据初步处理并转发给远程信息控制中心,同时还作为进行局部控制的信息依据.

摄像机节点可以获取的数据分为两类:照相数据和摄像数据.获取摄像数据对于摄像机节点的能耗和通信消耗都比较大,因此系统采用定期拍照的方法来获取养殖箱笼中的详细信息.情况需要时,如海参发生异常病变或箱笼受到人为盗窃等特殊情形,系统可以将节点工作模式转为摄像状态进行实时监控.

系统使用局部通信协议将照相数据直接传输给主节点加以压缩处理后,由主节点转发给远程信息控制中心.而摄像数据的信息量和复杂度都比较高,局部的主节点难以有效处理信息.因此使用摄像工作模式时,工作节点直接通过基于 GPRS 协议的远程通信技术与远程信息控制中心通信,提供基于 H.264 编码格式的实时视频监控.

系统在同一圆周平面上布放了 3 组摄像机,保证任意角度都可以有两台摄像机同时成像,如图 6 所示.这样可以在远程决策控制中心的系统上实现计算机视觉测量,便于分析海参尺寸和分布密度等养殖信息.

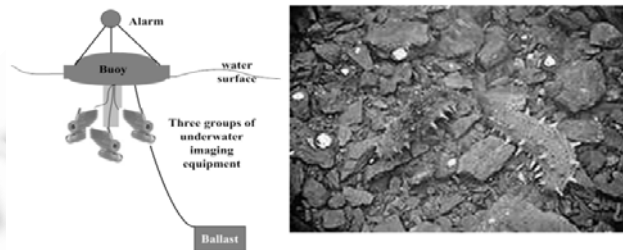


Fig.6 Underwater camera node schematic diagram and photo

图 6 水下摄像机节点工作示意图及成像图

4.3 信息处理传输子系统

该子系统节点与环境监测子系统和过程控制子系统中的节点构成主从节点关系,发挥中继通信和局部处理控制中心的角色,具备的主要功能包括:

(1) 数据中继转发:接受下层监控子系统发送的理化数据和水下照相数据,进行必要压缩后通过 GPRS 协议远程通信协议中继转发.

(2) 局部/全局反馈:节点要根据下层系统收集的传感数据和上层系统的控制指令发送控制信息给过程控制子系统完成局部和全局反馈控制.节点具有对收集的理化数据进行基本分析的功能.如:检测发现深度数据异常的话就会直接发消息给过程控制模块中的网箱物理控制系统进行调整.

由于此部分中节点承担中继控制的任务,可靠性要求高,系统采用主备节点设计,避免单点崩溃造成的系统失控.

为了保证节点能够满足 CPS 实时性要求,完成数据处理、通信中继和反馈控制等多种任务的实时调度,我们设计一种面向 CPS 应用的节点操作系统部署在主节点中.与一般的 WSN 节点操作系统不同,CPS 节点操作系统更加强调查实时性,我们采用了事件驱动和多线程协作的混合调度模式,并设计了共享栈和私有栈共存的内存管理机制,以确保节点操作系统对 CPS 中多类型任务的及时响应.

4.4 过程控制子系统

该子系统的功能是根据信息处理传输子系统的控制信息完成对物理设备的反馈控制.与环境监测子系统类似,该子系统也是与物理过程直接交互的模块.不同的是,构成监测系统的物理-信息传感器在市场上类型丰富而且技术相对成熟,但是过程控制子系统中的信息-物理控制系统的设计问题是组建 CPS 的关键问题.主要是

如何建立真实反映物理过程且便于反馈控制的动态模型.

物理过程可分为连续动态和离散动态两种,对应着信息系统中的连续组件和离散组件.传统上,两者分别用微分方程和有限状态自动机(finite state automata,简称 FSM)来分别建模.但在本系统设计中,我们使用自动机来统一建模,包括两种动态的混合建模.这样是为了最后使用参量模型进行系统组合构建,便于分析和验证.

以系统中的温度值对应的控温系统设计为例.刺参的生长有适宜温度要求,养殖水体的温度控制在 8℃~15℃.系统采用恒温器控制水体温度,我们利用自动机进行动态建模.自动机模型适用于需要计算时间消耗并执行特定时间动作的物理模型.其中时钟是自动机中用来测量时间的装置,可以用一阶微分方程来建模.

定义. 多速率时间自动机(multi-rate timed automata).

$$\forall \in T_m, \dot{s}(t) = a,$$

其中, $s: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, 属于连续时间信号, $s(t)$ 是时刻 t 的时钟值, T_m 是混合系统处于模式 m 的一个时间子集且 $T_m \subset \mathbb{R}$, 此时时钟速率 a 为一个常数.

恒温器具有加温装置,可以将温度调节到一个设定值范围内.其在自动机中的状态描述为 $States = \{heating, cooling\}$.设定温度低于 8℃,开启加热器,温度高于 15℃时关闭加热器.为了避免加热器频繁开关引起系统抖动,我们设计了一种策略来避免这种情况.即温度超过阈值后,加热器仍然保持原有的状态(开启或关闭)一段时间.我们对此策略进行建模,如图 7 所示.

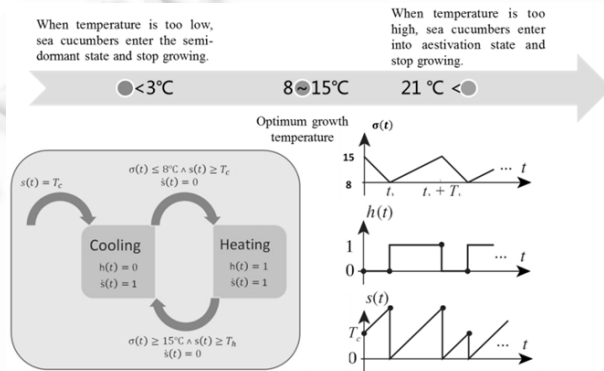


Fig.7 System thermostat timed automata model and parameter effect diagram

图 7 系统恒温器时间自动机模型及参数效果

其中,每个状态都有一个动态的连续时间信号 $s, s(t)$ 随时间 t 呈线性增长,表示为 $\dot{s}(t) = 1$.

$s(t) = T_c$ 是为了给初始状态 *cooling* 一个赋值,这样可以确保恒温器启动时,如果水温 $\sigma(t) \leq 8^\circ\text{C}$ 可以很快转移到 *heating* 模式,避免由于加热器不能及时启动造成养殖圈笼内水温继续下降,影响养殖环境.每次状态转移时,动作集都将时钟 s 复位为 0,同时判定式 $s(t) \geq T_h$ 以保证恒温器的加热器保持一定时间 T_h 的开启或关闭,避免系统频繁抖动. T_c 和 T_h 的具体值由系统的实际环境因素决定,与恒温器加热器功率和环境水体量有关的热能方程计算确定.

恒温器的控制参数效果如图 7 所示.假定初始温度处于 15°C 左右,此时状态机处于 *cooling* 状态直至温度降到 8°C 左右.在 t_1 时刻, $s(t_1) > T_c$,因此状态转移为 *heating* 模式.转移时, s 复位为 0,并开启加热器.加热器工作一段时间 $t_1 + T_h$,假定温度一直线性上升.则在 $t_1 + T_h$ 时刻,系统转移回 *cooling* 状态并关闭加热器.经过 T_c 时间后,水体再次冷却,温度降至 8°C ,再次发生状态转移.

4.5 远程决策控制中心

远程决策控制中心设在岸上,由如下系统模块构成:通信模块,信息采集控制模块和分析决策系统.

通信模块采用工业级无线 GPRS 模块搭建,具有覆盖范围广,数据传输率高,通信费用低等特点,实时响应能力也不错.

信息采集控制模块主要负责数据采集和反馈控制等功能,该模块直接将采集来的数据提交给分析决策系

统来进行相应处理,并接收返回的反馈控制数据,直接通过通信模块发回给海上的信息处理传输子系统完成远程控制.

分析决策系统要汇集所有的传感数据,包括养殖环境的理化数据和影像数据,进行综合分析后再依据专业规则进行相应决策.决策信息来源不但包括系统自我感知的数据,还包括其他系统提供的相关数据,如公共气象平台可以提供短长期气象信息预测,帮助决策系统做出更合理的控制决策;反之,系统感知的环境信息也可以作为气象平台预报的感知来源帮助做出更全面的气象预测.

中心的系统远程监控软件(v1.0)人机界面如图 8 所示.



Fig.8 Interface diagram of remote monitoring software for control center

图 8 养殖系统远程监控软件界面图

其中,对养殖影像数据的分析过程如图 9 所示,根据三维立体视觉成像原理,通过环境监测子系统中摄像机位置的标定(L 和 R 处分别为两台摄像机),控制中心的立体视觉系统可以根据拍摄的水下照片提取出海参尺寸的大小,进而掌握海中海参的生长情况,见表 2.这项功能在水产养殖中的发挥的作用很大,因为与陆地养殖情况不同,海下情况不为人见,专业养殖人员不易下水,而专业潜水人员对于养殖知识又不了解.通过水下实现视觉传感,不但可以详细获知水下养殖情况,还能自动分析海参的生长情况,对收获海参时间的选取意义重大.

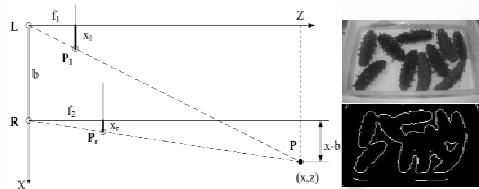


Fig.9 Stereoscopic imaging schematic diagram and photos

图 9 立体视觉成像示意图及实拍图

Table 2 Analysis table of 10 sea cucumbers dimension extraction

表 2 10 个海参外形尺寸提取分析表

海参外形尺寸(cm)	个数	占总数百分比(%)
< 5.0	1	10
5.0~6.0	2	20
6.0~7.0	5	50
> 7.0	2	20
合计	10	100

5 总结与展望

文章研究了 CPS 的关键属性和系统特征等理论特点,并根据 CPS 体系架构设计了一个部署中的面向海参

养殖的信息物理融合系统,以实现在水产领域从粗放低效的传统生产模式向精细高效的信息化生产模式的转变.系统主要由4个子系统构成,实现了CPS感知、互联、决策和反馈的基本功能,以及实时性、兼容性和反馈性的主要特点.文章重点阐述了针对物理与信息过程交互部分进行设计时所采用的方法和技术,基于自动机理论对物理过程进行信息系统建模的方法符合CPS设计思想,有助于在此基础上使用参量模型建构具备可靠性的CPS整体系统.

系统中,通信时延对于实时感知和反馈的影响仍然是系统设计面临的重要问题,也是业界科研的热点方向,有待于进一步研究解决.

同时需要指出的是,CPS是物理领域和信息领域充分融合的综合系统.信息专家必须要综合领域专家的知识来进行CPS的系统搭建.信息系统由信息专家设计和完成,其中的知识和内容却是由领域专家负责的.这也符合策略与机制分离的系统设计思想.CPS提供了一种科学机制来完成目标应用,但系统的成效与领域专家给出的相应策略密切相关.具体到海参养殖领域,仍然有很多海参的生长机理问题有待水产专家研究确定.随着这种物理信息融合过程的不断深化,面向海参养殖的CPS完全可以推广至更广泛的水环境应用中.

致谢 在此,我们向对本文工作给予支持和建议的同行们表示感谢.

References:

- [1] Qin C. Research on structure of culturing sea cucumber *apostichopus japonicus selenka* and its optimization in pond [Ph.D. Thesis]. Qingdao: Ocean University of China, 2009 (in Chinese with English abstract).
- [2] Dong S. History, principles and classification of integrated aquaculture in China. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2011,(5):1202–1209 (in Chinese with English abstract).
- [3] Shen H, Chen J, Li H, Liu Y, He X. Progress of studies on the culture techniques of sea cucumber worldwide. *Hebei Fisheries*, 2007,(6):3–5,13,20 (in Chinese with English abstract).
- [4] Lee EA, Seshia SA. Introduction to Embedded Systems, A Cyber-Physical Systems Approach, 2011. <http://LeeSeshia.org>
- [5] <http://en.wikipedia.org/wiki/Cybernetics>
- [6] http://en.wikipedia.org/wiki/Internet_of_things
- [7] Lee EA. Cyber physical systems: Design challenges. In: Proc. of the 11th IEEE Int'l Symp. on IEEE, Object Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC). 2008. 363–369.
- [8] Sifakis J. A vision for computer science—the system perspective. *Central European Journal of Computer Science*, 2011,1(1): 108–116.
- [9] Du XZ, Qiao JZ, Lin SK, *et al.* The design of node operating system for cyber physical systems. *Procedia Engineering*, 2012,29: 3717–3721.
- [10] Wu FJ, Kao YF, Tseng YC. From wireless sensor networks towards cyber physical systems. *Pervasive and Mobile Computing*, 2011,7(4):397–413.
- [11] Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramaniam Y, *et al.* Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 2002,38(4):393–422.
- [12] Ni M, Li M, Xue G. The research of basic theory and key technology for wireless sensor networks. 2007 Computer Science and Technology Development Report, 2007. 384–412 (in Chinese with English abstract).
- [13] Akyildiz IF, Pompili D, Melodia T. Underwater acoustic sensor networks: Research challenges. *Ad Hoc Networks*, 2005,3(3): 257–279.
- [14] Heidemann J, Ye W, Wills J, *et al.* Research challenges and applications for underwater sensor networking. In: Proc. of the Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC 2006). 2006,1:228–235.
- [15] Partan J, Kurose J, Levine BN. A survey of practical issues in underwater networks. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2007,11(4):23–33.
- [16] Wang Y, Liu Y, Guo Z. Three-Dimensional ocean sensor networks: A survey. *Journal of Ocean University of China*, 2012,11(4): 436–450.

- [17] Liu Y, He Y, Li M, *et al.* Does wireless sensor network scale? A measurement study on GreenOrbs. In: Proc. of the INFOCOM. 2011. 873–881.
- [18] Mo Li, Liu YH. Underground coal mine monitoring with wireless sensor networks. ACM Trans. on Sensor Networks (TOSN), 2009,5(2).
- [19] Liu K, Yang Z, Li M, *et al.* Oceansense: Monitoring the sea with wireless sensor networks. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2010,14(2):7–9.
- [20] Vaddadi SK, Sadistap SS, Kumar P. Development of embedded wireless network and water quality measurement systems for aquaculture. In: Proc. of the 6th Int'l Conf. on Sensing Technology (ICST). IEEE, 2012. 637–641.
- [21] Lloret J, Sendra S, Garcia M, *et al.* Group-Based underwater wireless sensor network for marine fish farms. In: Proc. of the GLOBECOM Workshops (GC Wkshps). 2011. 115–119.
- [22] Dees W, Phillips F, Bender P, *et al.* Aquatic-Based cyber-physical systems in the Calcasieu Estuary. In: Proc. of the 6th ACM Int'l Workshop on Underwater Networks. ACM, 2011. 19.
- [23] Huang JQ, Wang WX, Jiang S, Sun DZ, Ou GC, Lu KK. Development and test of aquacultural water quality monitoring system based on wireless sensor network. Trans. of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013,4(2):183–190 (in Chinese with English abstract).
- [24] Li J, Gao H, Yu B. The concept, characteristics, challenges and research progress of CPS. 2009 Computer Science and Technology Development Report. 2010. 1–17 (in Chinese with English abstract).
- [25] Li RF, Xie Y, Li R, Li L. Survey of cyber-physical systems. Journal of Computer Research and Development, 2012,49(6): 1149–1161 (in Chinese with English abstract).
- [26] Rajkumar RR, Lee I, Sha L, *et al.* Cyber-Physical systems: The next computing revolution. In: Proc. of the 47th Design Automation Conf. ACM, 2010. 731–736.

附中参考文献:

- [1] 秦传新. 刺参(*Apostichopus Japonicus Selenka*)的池塘养殖结构及其优化研究[博士学位论文]:青岛:中国海洋大学,2009.
- [2] 董双林. 中国综合水产养殖的发展历史、原理和分类. 中国水产科学, 2011(5):1202–1209.
- [3] 沈辉, 陈静, 李华, 刘亚军, 何晓明. 国内外海参养殖技术研究概况. 河北渔业, 2007(6):3–5, 13, 20.
- [12] 倪明选, 李明禄, 薛广涛. 无线传感网络的基础理论及关键技术研究. 见: 2007 年度中国计算机科学技术发展报告. 北京: 中国计算机学会, 2007. 384–412.
- [23] 黄建清, 王卫星, 姜晟, 孙道宗, 欧国成, 卢康祥. 基于无线传感器网络的水产养殖水质监测系统开发与试验. 农业工程学报, 2013, 4(2):183–190.
- [24] 李建中, 高宏, 于博. 信息物理融合系统(CPS)的概念、特点、挑战和研究进展. 见: 2009 年度中国计算机科学技术发展报告. 北京: 中国计算机学会, 2010. 1–17.
- [25] 李仁发, 谢勇, 李蕊, 李浪. 信息-物理融合系统若干关键问题综述. 计算机研究与发展, 2012, 49(6):1149–1161.



杜晓舟(1982—),男,辽宁沈阳人,博士生,
主要研究领域为 CPS,网络嵌入式系统.
E-mail: duxiaozhou.neu@gmail.com



乔建忠(1964—),男,博士,教授,主要研究
领域为分布式计算,人工智能.
E-mail: qiaojianzhong@mail.neu.edu.cn



贾兵(1981—),男,工程师,主要研究领域为
信号处理,网络嵌入式系统.
E-mail: jbrobin@sina.com



林树宽(1966—),女,博士,教授,主要研究
领域为机器学习,人工智能.
E-mail: lins hukuan@mail.neu.edu.cn