

无人水面艇嵌入式基础运动控制系统研究

廖煜雷 庞永杰 庄佳园

(哈尔滨工程大学水下智能机器人技术国防科技重点实验室 哈尔滨 150001)

摘要 从硬件和软件两方面详细地讨论了无人水面艇嵌入式基础运动控制系统的体系结构。该运动控制系统采用了便于调试和监控的底层工控机和顶层控制机相结合的模式。同时详细阐述了无人水面艇基础运动控制系统的控制任务划分、运动控制实现、控制算法等流程。最后通过仿真试验表明,整个嵌入式基础运动控制系统满足可行性和可靠性要求。

关键词 无人水面艇,嵌入式系统,运动控制,体系结构,S面控制

中图分类号 TP24 **文献标识码** A

Study of the Embedded Basic Motion Control System for an Unmanned Surface Vehicle

LIAO Yu-lei PANG Yong-jie ZHUANG Jia-yuan

(National Key Laboratory of Science and Technology on Autonomous Underwater Vehicle,
Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract This paper studied the embedded basis motion control system problem for an unmanned surface vehicle from the viewpoint of the hardware and software. The motion control system takes the combinative model which is convenient for debugging and monitoring the bottom of IPC and the top-level control. Synchronously, it expatiated in detail the unmanned surface vessels basis motion control system flow of control tasks partition, control motion and control arithmetic etc. Finally, the reliability and feasibility of the whole embedded basis motion control system was verified by simulation trial.

Keywords Unmanned surface vehicle, Embedded system, Motion control, Architecture, S-surface controller

1 引言

无人水面艇,简称无人艇或USV(Unmanned Surface Vehicle),其研发晚于陆地机器人、无人机和水下机器人,目前已有多种无人艇应用于科研、军事等领域^[1]。Manley和Veers总结了无人艇的研究历史、现状以及发展趋势^[2,3]。但迄今为止只有美国、以色列等国的研究取得了一些实质性的进展,其中以美国的“SPARTAN”、以色列的“Protector”为代表。目前国内无人艇技术处于概念设计阶段,与美国等西方发达国家相比存在很大差距。在无人艇运动控制和仿真方面,哈尔滨工程大学的高双等人提出了无人艇的几种控制算法^[4,5],陈慈发等提出了水面无人艇测控系统设计方法^[6]。这些对无人艇的控制、仿真和相关应用做出了有益的研究,但国内在无人艇的基础运动控制系统以及体系结构方面的研究还很少。本文着重在基础运动控制系统方面进行研究尝试。

无人艇具有航速快、机动性强、模块化、所处海洋环境复杂等特点,在系统集成、总体设计、综合驾控等方面是难点。无人艇基础运动控制系统的核心是其嵌入式计算机系统。考虑到相关技术的成熟性、可行性,本文中的无人艇嵌入式基础

运动控制系统采用了底层工控机加顶层控制机的模式,为今后实现完全自主式无人艇打下了基础。本文详细阐述了利用Wind River公司的VxWorks实时操作系统,采用PC/104模块组成多板式嵌入系统。将数据采集与融合处理、控制指令的理解和下达、故障诊断、与外设的通信等功能集成于该嵌入式系统中,同时控制算法在控制机中实现。

2 基础运动控制系统的硬件体系结构

无人艇系统由无人艇载体、岸基(母船)监控系统、无线数据通信系统等3大部分构成,如图1所示。其中无人艇载体为整个系统的核心部分,它具有以下主要设备:①目标探测设备:雷达、摄像机、激光探测仪等;②导航设备:磁罗经、GPS系统;③环境感知设备:风速风向仪等;④发动机、喷水推进器以及相关传感器等。

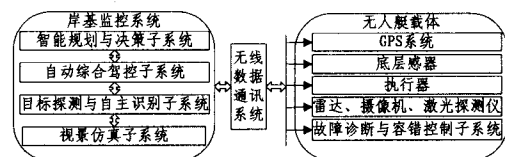


图1 无人艇的系统构成图

到稿日期:2009-10-10 返修日期:2009-12-27 本文受国家自然科学基金(50579007),水下智能机器人技术国防科技重点实验室研究基金(HEUFT08017)资助。

廖煜雷(1985-),男,博士生,主要研究方向为无人水面艇的智能控制与运动仿真,E-mail:liaoylei@hrbeu.edu.cn;庞永杰(1955-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为水下机器人系统设计与仿真;庄佳园(1985-),男,博士生,主要研究方向为无人水面艇的运动规划。

本文没有采用智能无人机、水下机器人等使用的完全嵌入的控制系统^[7],而是采用了便于调试和监控的底层工控机和顶层控制机相结合的模式。无人艇载体中自带工控机 PC/104,采用 Wind River 公司的实时多任务操作系统 VxWorks 操作系统。同时岸基控制机采用 Windows 下的 VC++ 建立监控系统。岸基控制机与无人艇载体之间通过无线数据通信系统进行通讯,实现了远距离的无线实时监控,同时预留了网络调试接口。

无人艇的基础运动控制系统硬件体系结构如图 2 所示,载体部分为 PC/104,岸基监控系统为 X86PC 机。下面分两部分来介绍。

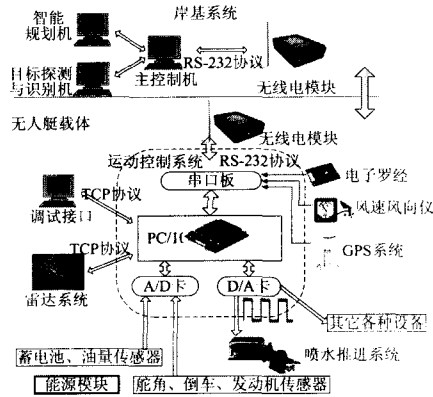


图 2 无人艇基础运动控制系统硬件体系结构图

2.1 载体部分

载体的核心采用了基于 PC/104 总线的多板嵌入式系统,包括集成 Celeron(M)处理器的核心模块、8 通道的串口板模块、基于 PC/104 总线的 A/D、D/A 卡模块以及一个提供 5V 电压的电源模块。

核心模块采用 Intel 处理器和 PIIX-4 芯片组,集成了 Intel82559ER 网卡和 CompactFlash 接口。通过采用 CompactFlash 取代其它外部存储器,大大提高了嵌入式系统的稳定性。

串口板模块采用了 Diamond 公司的基于 PC/104 总线的 8 通道串口板 EMM-8。它集成了两个 16554 异步串行通信接口,传输波特率最高能达到 460.8kbps,允许中断共享。我们通过串口板与磁罗经、GPS、Wind3150、GD230VH-E 无线数传电台进行数据通信。

A/D 卡、D/A 卡模块采用了 Diamond 公司的板卡。A/D 采集卡用于采集舵角和倒车传感器、油量和电量传感器、发动机和推进器传感器等的模拟信息。D/A 板卡能够提供多种电压的模拟信号,通过 D/A 卡向无人艇的发动机、倒车动力泵等设备发送信号,从而实现位置或速度控制。

在数据通信方面,主要是应用串口和网络来实现。模块之间采用 PC/104 总线通信,而串口板模块与外部传感器之间采用 RS-232 协议进行串行通信。目标探测与识别子系统主要采用了 Raymarine 公司的雷达,它与工控机之间采用 TCP 协议进行通信。它可提供目标的运动和状态信息(如目标大小、位置、运动速度等),可对目标探测及实时避碰提供有力保障。

2.2 岸基部分

3 台 PC 构成了控制系统的岸基部分。主控制机负责基础运动控制和视景仿真,同时负责与工控机进行数据通信。

目标探测与识别机负责处理雷达系统和光视觉系统探测到的目标信息(已在底层经过特征提取),然后以图形界面形式复原显示出目标的相应状态,并完成目标探测和识别。智能规划机负责路径规划和决策控制。PC 机之间采用了 TCP 协议进行网络通讯。值得一提的是,工控机与控制机之间的数据通讯依赖于无线数据通信系统,因此可靠、高效的无线电系统在系统构成中占有重要地位。

3 基础运动控制系统的软件体系结构

无人艇的基础运动控制系统主要由底层的环境和运动感知、数据处理与融合、故障诊断与紧急处理、无线数据通讯、指令理解与执行和顶层的控制算法等几大部分组成,如图 3 所示。对比甘永博士提出的水下机器人 PCE 运动控制系统体系结构观点^[8],本文中软件体系结构相当于是把感知层、执行层在工控机中实现;而控制层在控制机中得以实现。同时在软件体系结构设计上充分考虑了扩展要求,为日后控制层的嵌入预留了接口。

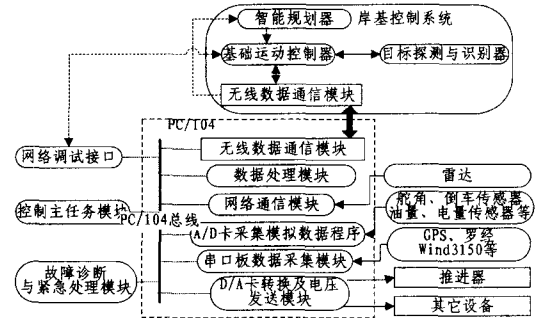


图 3 运动控制系统的软件体系结构图

3.1 数据流和控制流

图 4 为运动控制系统的流图(灰色细线)和控制流(黑色粗线)图。具体说明如下:①基础运动控制器发出的控制指令,表现为所需推力的大小、舵角等;②环境和运动状态反馈,表现为无人艇的位置、姿态、速度等底层传感器原始数据流;③经过数据处理后的传感器数据;④给未来嵌入的规划、目标探测识别等系统的数据流;⑤未来嵌入规划等模块的规划指令控制流;⑥无人艇各种设备和传感器的工作状态、数据监测输入数据流;⑦故障诊断后依据控制策略采取的相应措施,下达紧急控制指令,如紧急停车、紧急加速等;⑧将故障诊断结果报告监控系统。

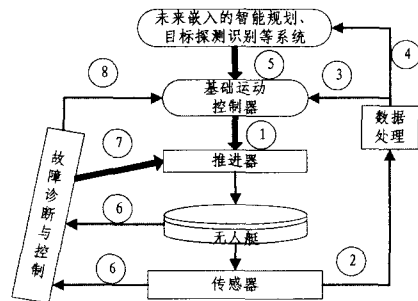


图 4 运动控制系统的流图

3.2 控制任务划分

在工控机 PC/104 中采用了 Wind River 公司的嵌入式多任务实时操作系统 VxWorks。它以其良好的可靠性和卓越的实时性被广泛地应用在通信、军事、航空、航天等高精尖技

术及实时性要求极高的领域中^[9]。工控机系统运行时,所执行的任务按功能主要分为5类:

①控制主任务。前面已经提到,软件体系结构的设计兼顾了今后控制层嵌入的要求,所以工控机中利用 VxWorks 提供的定时器机制 Watchdog 建立了控制主任务模块,控制节拍为 0.5s/次。该任务每隔 0.5s 调用一次数据处理任务处理传感器数据、调用指令下达任务进行控制指令的下达以及调用故障诊断与紧急处理任务进行故障诊断。今后可在此任务中嵌入运动控制算法、规划算法等智能模块,从而实现真正的自主式无人艇。

②信息采集和指令下达。包括:(1)环境与运动状态感知任务,获取底层传感器的数据,数据主要为从串口板获取的罗经信息、GPS 信息、Wind3150 信息;从 A/D 采集卡获得的电池电量、油量信息;推进器系统的发动机、舵角、倒车传感器信息;通过网络获取的雷达信息;(2)控制指令的获取、理解及任务下达,向 D/A 卡写控制指令,以控制执行器和各类设备。

③通信任务。包括无线数据通信任务和网络通信任务。(1)正常工作状态下,利用无线数据通信系统实现工控机与控制机间的数据通信,每 0.5s 接收一次控制指令,并向控制机发送一次底层的状态信息。(2)同时,预留了基于 TCP 协议的网络调试接口,以便各个阶段的系统调试。

④数据处理。传感器数据的准确性对整个系统的正常运行极为重要。无人艇工作于复杂的海洋环境中,扰动噪声大。各种传感器普遍存在精度低、野点率高的缺点,因此传感器数据的处理显得尤为重要。首先进行数据预处理,剔除野点,然后进行数据滤波。为了简便,本文采用了简单实用的五点三次滤波算法。

⑤故障诊断与紧急处理。考虑到无人艇工作时设备故障以及紧急处理的需要,例如传感器、执行器故障等,及时发现故障对于保障作业安全具有重要的现实意义^[10,11]。本文系统中建立了简单的故障诊断与紧急控制任务。限于篇幅,故省略。

3.3 控制算法

对于无人艇这样的非线性、时变系统,采用的控制方法主要是神经网络和模糊逻辑控制等。本文采用简单实用的 S 面控制算法,此方法将模糊控制的思想与 PID 的简单控制结构相结合,在水下机器人运动控制中得到了广泛应用。其算法描述如下^[12]:

将常规模糊控制器的控制规则(见表 1)的主对角线数值连成折线。对于这样的折线,可以用一条光滑曲线(一个 Sigmoid 函数)来拟合。事实上,光滑曲线可以看作无数条长度趋向于零的折线相连。同理,整个模糊控制规则库对应的折线面就可以用光滑曲线的曲面代替。

表 1 控制规则表

4	3	2	1	0
3	2	1	0	-1
2	1	0	-2	-2
1	0	-1	-2	-3
0	-1	-2	-3	-4

一般地,Sigmoid 曲线函数为

$$u=2.0/(1.0+\exp(-kx))-1.0 \quad (1)$$

那么,Sigmoid 曲面函数为

$$z=2.0/(1.0+\exp(-k_1x-k_2y))-1.0 \quad (2)$$

因此本文中用到的 S 面控制器的控制模型为

$$u=2.0/(1.0+\exp(-k_1e-k_2\dot{e}))-1.0 \quad (3)$$

式中, e_i 和 \dot{e}_i 为第 i 自由度控制的输入信息(分别为偏差和偏差变化率,通过归一化处理), u 为控制力输出。图 5 的三维光滑曲面表达了偏差、偏差变化率与控制力之间的关系。

$$\begin{cases} u_i=2.0/(1.0+\exp(-k_{i1}e_i-k_{i2}\dot{e}_i))-1.0+\Delta u_i \\ f_i=K_i u_i \end{cases} \quad (4)$$

式中, u_i 为第 i 自由度归一化的控制输出; k_{i1}, k_{i2} 分别为对应第 i 自由度偏差和偏差变化率的控制参数,可以改变其对应自由度的变化速度; Δu_i 为通过自适应方式得到的固定干扰力归一化后的大小; f_i 为该自由度上所需力的大小; K_i 为该自由度上所能提供的最大推力(或力矩)。

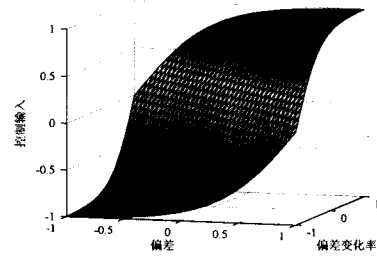


图 5 Sigmoid 曲面

显然,通过调整 k_{i1} 和 k_{i2} 可以改变控制器的收敛速度,即控制器需要调整的参数只有 k_{i1} 和 k_{i2} 。可看出在模型结构形式上 S 面控制器和 PD 控制器具有很大相似性,区别在于后者是线性的,前者是非线性的。如果要求控制的偏差和偏差变化率属于负大的隶属度均为 1 时,控制输出属于正大的隶属度为 1。为了保证 1% 以内的误差,由式(2)可以确定 k_{i1} 和 k_{i2} 的值应该选择在 3.0 左右。如果超调大了,可以适当减小 k_{i1} 而增加 k_{i2} ;反之,如果收敛速度慢了,则可以适当增加 k_{i1} 而减小 k_{i2} 。本文选 k_{i1} 为 3.0,而选 k_{i2} 为 4.0。

4 仿真试验与分析

本文研究的对象为无人水面艇(USV),其艇型采用的是单体滑翔艇,主要船型参数为:排水量 7.7t、船长 10.35m、船宽 2.88m、吃水 0.68m、设计航速 30 节。推进方式采用双泵喷水推进器,可调节喷水方向、倒车斗和推力来进行速度、位置、船向等控制。输入功率 45~80kW,额定转速 5500~6900r/min,喷口直径 85mm,叶轮直径 150mm,重量 18kg。无人艇的运动控制仿真数学模型根据实际水动力实验获得的水动力系数建立。

对设计的控制系统进行仿真试验,验证其软硬件的可靠性和可行性。方法如下:采用两台 PC 机分别作为控制机和仿真机,并使用一个基于 PC/104 总线多板嵌入式系统。(1)控制机实现控制算法、视景仿真以及下达控制命令。控制机同嵌入式系统之间采用串口通信(模拟实际中的无线电数据通信);(2)嵌入式系统实现控制命令的接收并下达给仿真机(模拟实际中的 D/A 板命令下达),且用串口和网络通信方式完成仿真机传感器数据的采集(模拟实际中的各种传感器的数据采集),传感器数据经处理后反馈给控制机;(3)仿真机实现无人艇水动力和运动传感器仿真。依据无人艇数学模型和接到的控制命令,在仿真机中模拟无人艇的运动,同时产生

相应的虚拟传感器数据。将控制机和嵌入式系统与仿真机相连进行仿真实验,无人艇的基础运动控制试验结果如图6所示。

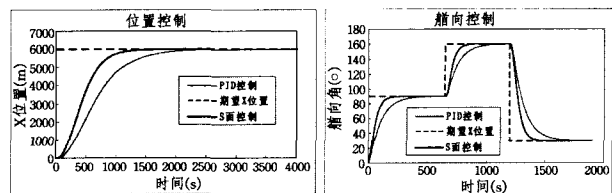


图6 无人艇基础运动控制试验结果

由仿真试验结果可知,两种控制方法都具有良好的控制能力。相比PID控制器,S面控制器具有更好的动态控制响应特性,其收敛速度、超调量等多种性能都明显优于PID控制器。S面控制器与PID控制器不同的是,前者采用非线性函数来拟合具有强非线性特性的控制对象,控制效果好于PID控制器。然而,S面控制和PID控制、模糊控制一样,存在难以解决运动耦合的问题,以及不具备在线学习的能力。

结束语 仿真试验结果表明,基础运动控制系统能够正常工作,并验证了系统的软件逻辑、软件体系结构、硬件体系结构、数据接口及其系统集成的合理性和可行性。试验表明,文中嵌入式运动控制系统的体系结构和数据接口等满足设计要求,这为今后的相关研究提供了技术基础。

无人艇控制系统在软件上采用简单实用的控制算法;硬件上选用基于PC/104总线的多板嵌入式系统;同时采用了VxWorks实时操作系统。这些充分保证了控制系统的实时性,能满足无人艇航速快、机动性强的要求。

在数据滤波、控制算法、故障诊断与紧急处理等方面仍然需要完善,尤其是无人艇在复杂海洋环境中的运动控制性能等需要验证。这些将是以后运动控制系统的研究重点和需要

不断改进的内容。

参考文献

- [1] 徐玉如,苏玉民,庞永杰.海洋空间智能无人运载器技术发展展望[J].中国舰船研究,2006,1(3):2-4
- [2] Manley J E. Unmanned Surface Vehicles, 15 Years of Development[C]//Proc. Oceans 2008 MTS/IEEE Quebec Conference and Exhibition, Ocean'08, Quebec City, 2008:1-4
- [3] Veers J, Bertram V. Development of the USV Multi - Mission Surface Vehicle III[C]//5th Int. Conf. Computer and IT Application in the Maritime Industries. COMPIT, 2006:345-355
- [4] 高双,朱齐丹,李磊.基于神经网络的高速无人艇模糊PID控制[J].系统仿真学报,2007,19(4):776-777
- [5] 高双,朱齐丹,李磊.滑翔艇高速运动建模与姿态控制仿真[J].系统仿真学报,2008,20(16):4461-4462
- [6] 陈慈发,叶祥明,宋亚萍,等.基于多智能体技术的水面无人艇测控系统研究[J].舰船科学技术,2008,30(3):88-89
- [7] 甘永,王丽荣,刘建成,等.水下机器人嵌入式基础运动控制系统[J].机器人,2004,26(3):246-249
- [8] 甘永.水下机器人运动控制系统体系结构的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2007
- [9] 孔祥营,柏桂枝.嵌入式实时操作系统VxWorks及其开发环境Tornado[M].北京:中国电力出版社,2002:1-42
- [10] 王丽荣,徐玉如.水下机器人传感器故障诊断[J].机器人,2006,28(1):25-26
- [11] Omerdic E, Roberts G. Thruster Fault Diagnosis and Accommodation for Open-frame Underwater Vehicles[J]. Control Engineering Practice, 2004, 12:1575-1598
- [12] 刘学敏,徐玉如.水下机器人运动的S面控制方法[J].海洋工程,2001,19(3):81-84

(上接第163页)

结束语 本文提出了一种采用IRP请求序列的恶意软件检测方法,相比传统的病毒检测方法在检测率及检测速度上均具有很大优势。本文方法不仅可以实现静态检测,还可以实现动态检测,采用MBMAS动态监视系统IRP请求,实时将请求序列送给MDMI进行检测,一旦达到匹配阈值即报警。MDMI的动态检测能力为计算机病毒免疫系统的设计提供了一个新的方向。

参考文献

- [1] Jerne N K. Towards a network theory of the immune system [J]. Annual Immunology, 1974, 125C(1/2): 373-389
- [2] Forrest S, Perelson A S, Allen L, et al. Self-nonself discrimination in a computer[C]//The IEEE Symposium on Research in Security and Privacy. Oakland: IEEE, 1994: 202-212
- [3] Forrest S, Hofmeyr S A, Somayaji A. Computer immunology [J]. Communications of the ACM, 1997, 40(10): 88-96
- [4] Harmer P K, Williams P D, Gunsch G H, et al. An artificial immune system architecture for computer security applications [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(3): 252-280
- [5] Dhaeseleer P, Forrest S, Helman P. An immunological approach

- to change detection: algorithms, analysis and implications[C]//IEEE Symposium on Security and Privacy. Oakland: IEEE, 1996: 110-119
- [6] Kephart J O, Sorkin G B, Swimmer M. An immune system for cyberspace[C]//IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Orlando: IEEE, 1997: 879-884
- [7] Forrest S, Hofmeyr S A, Somayaji A, et al. A sense of self for unix processes[C]//IEEE Symposium on Security and Privacy. Oakland: IEEE, 1996: 120-128
- [8] Lee H, Kim W, Hong M P. Biologically inspired computer virus detection system[C]//1st International Workshop on Biologically Inspired Approaches to Advanced Information Technology. Lausanne: Springer, 2004: 153-165
- [9] Li Tao. Dynamic detection for computer virus based on immune system [J]. Science in China, Series F-information Sciences, 2008, 51(10): 1475-1486
- [10] 李涛. 计算机免疫学 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 60-62
- [11] Hofmeyr S, Forrest S. Architecture for an artificial immune system [J]. Evolutionary Computation, 2000, 8(4): 443-473
- [12] Manzoor S, Shafiq M Z, Tabish S M, et al. A sense of 'danger' for windows processes[C]//LNCS, ICARIS. Heidelberg: Springer, 2009, 5666: 220-233