

文章编号: 1002-0446(2004)03-0246-04

水下机器人嵌入式基础运动控制系统*

甘永,王丽荣,刘建成,徐玉如

(哈尔滨工程大学船舶工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 从硬件和软件两方面详细地讨论了水下机器人嵌入式基础运动控制系统的体系结构,从根本上改变了以往水下机器人运动控制系统依靠上位机与下位机相结合的体系结构.同时详细阐述了水下机器人基础运动控制的整个信息流程.最后通过海上试验验证了整个基础运动控制系统的可行性和可靠性.

关键词: 水下机器人; 嵌入式系统; S 面控制; 体系结构

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

The Embedded Basic Motion Control System of Autonomous Underwater Vehicle

GAN Yong, WANG Li-rong, LIU Jian-cheng, XU Yu-ru

(Department of Naval Architecture and Oceanic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: The architecture of the AUV's embedded motion control system is presented from the viewpoint of the hardware and software, which is different from the traditional control system of the AUV. Meanwhile, the whole information flow of the motion control system is also discussed. Finally, the reliability and feasibility of the motion control system verified by sea trial is given.

Keywords: autonomous underwater vehicle (AUV); embedded system; S-surface controller; architecture

1 引言 (Introduction)

智能水下机器人在军事应用和海洋开发方面有极为广阔的应用前景,已成为西方发达国家发展智能化海军武器的重要方向之一^[1].水下机器人运动控制的核心是嵌入式计算机系统,它需具有运动控制算法的实现、数据采集、与外设的通信等功能.水下机器人的嵌入式运动控制系统以往都是采用工控机与顶层的控制机组合来实现.工控机往往被安放在水下机器人内部,利用汇编语言实现与速度计等外设之间的通信;而控制机往往被安放在母船或岸上,利用高级语言来实现控制算法,通过光纤通信来与底层的工控机实现数据通信.这样的控制系统所组成的都不是纯粹意义上的自主式水下机器人.

本文利用 Wind River 公司的 vx Works 实时操作系统,采用 PCI04 模块组成多板式嵌入系统,将整个系统都内嵌在水下机器人内部.运用该嵌入式系统,完成数据采集、外设通信,实现控制算法等功能,

真正实现自主式水下机器人.

2 水下机器人系统组成 (AUV's system architecture)

“智水-IV”水下机器人是由哈尔滨工程大学牵头研制的水下机器人.整个研制过程分为若干阶段.图1为“智水-IV”号水下机器人的成品阶段的组成系统.与以往的水下机器人相比,它不再需要顶层控制机与底层工控机相结合,所有的系统都已经嵌入到了水下机器人内部,在顶层仅仅需要一个监控系统对底层进行监控,这样为实现水下机器人的自主作业提供了关键性的技术.现阶段正处于水下机器人的初步调试阶段,在该阶段主要是进行水下机器人基础运动控制系统、自主导航系统和规划系统的调试.

3 基础运动控制系统的硬件体系结构 (Hardware architecture of basic motion

control system)

图 2 是“智水-IV”号水下机器人的多板嵌入式基础运动控制系统,它采用基于 PCI04 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 PCI04 总线的 A/ D、D/ A 卡模块以及一个提供 5 伏电压的电源模块^[2].

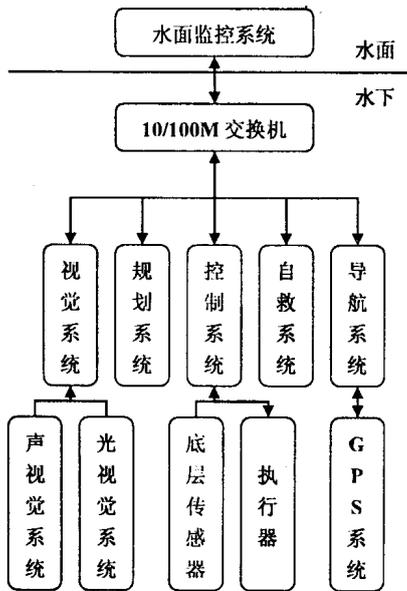


图 1 “智水-IV”号水下机器人系统组成

Fig.1 Architecture of the “AUV-IV”

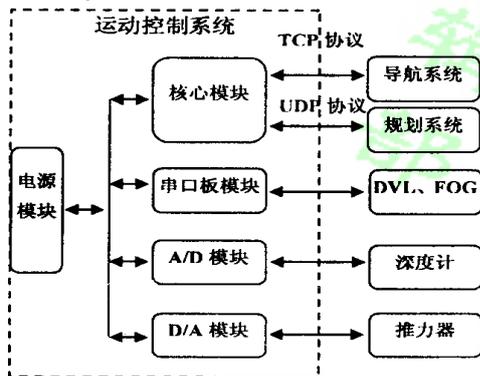


图 2 基于 PCI04 总线的嵌入式运动控制系统

Fig.2 Embedded motion control system with PCI04 BUS

核心模块采用的是 Intel 处理器,采用 PIII-X4 芯片组,集成了 Intel82559ER 网卡和 CompactFlash 接口.通过采用 CompactFlash 取代了其它外部存储器,大大提高了嵌入式系统的稳定性.

串口板模块采用的是 Diamond 公司开发的基于 PCI04 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,具有 64 字节的缓冲区,

传输波特率最高能达到 460.8kbps,允许中断共享. A/ D、D/ A 卡模块也是采用 Diamond 公司开发的板卡,其中 D/ A 板卡能够提供 16 种电压的模拟信号.

模块之间采用 PCI04 总线通信,核心模块与导航、规划系统之间采用 TCP 协议与 UDP 协议的网络通信,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.我们通过 A/ D 采集卡来获得深度计信息、电池电压和漏水等信息.通过 D/ A 卡向水下机器人的无刷电机推进器发送模拟电压信号,使推进器发出水下机器人所需的推力,从而实现位置或速度跟踪控制.

在数据通信方面,主要是应用串口和网络来实现的.在网络通信中,通过采用 TCP 协议来与水下机器人其他的控制系统进行数据交换(如上层监督系统),同时也可以与我们的水下机器人的仿真系统互连来进行联调.另外通过 NFS 和 UDP 协议与导航以及规划系统进行数据通信,来获得目标指令.串口主要是用来与各种传感器之间,如速度计(DVL)、光纤陀螺(FOG)等,进行通信.通过自行编写 vx-Works 操作系统下的串口板卡驱动,来调用相应的系统函数,进行与外设之间的通信^[3].

4 基础运动控制系统的软件体系结构 (Software architecture of basic motion control system)

水下机器人的基础运动控制系统在软件体系结构上主要包括传感器数据处理、控制算法以及推力分配 3 部分.图 3 为“智水-IV”基础运动控制系统软件信息流程图.

图 3 中,①为目标规划指令,②为控制算法的输出,即每个自由度上所需要的推力,③为经过推力分配后发给推力器的电压指令,④为从底层传感器获得的原始数据,⑤为经过数据预处理后的传感器数据,⑥则是经过数据滤波后的传感器数据,它和①一起作为控制算法的输入.

vx Works 是基于优先级的抢占式多任务调度的嵌入式实时操作系统^[4],控制系统在 vx Works 下的实现具体就体现为多个任务的调度,任务的划分在软件体系结构中显得尤其重要.

系统运行时,所执行的任务按功能分为 4 类:

(1) 传感器数据的获取以及规划指令的获得

主要包括获取规划系统传来的目标指令,获取导航系统的导航信息以及获取基础运动控制系统底层传感器数据.其中传感器数据又包括通过串口板

获取速度计 (DVL)、光纤陀螺 (FOG) 和定高声纳的信息, 和通过 A/D 卡获得深度信息、漏水和电池电压信息等。

(2) 基础运动控制器

包括传感器数据处理、控制算法、推力分配 3 部分, 数据处理主要是对所获得数据进行预处理(即野点剔除、数据融合)、平滑滤波等; 控制器的输入为数据处理之后的传感器信息和规划系统下达的目标状态值, 输出为水下机器人各个运动自由度上所需的推力; 推力分配则是将控制器解算出的各个自由度上的推力转化成具体的某个推力器上的电压。

(3) 数据以及指令的输出

包括通过 NFS 协议, 将水下机器人当前状态信息传递给上层规划系统与导航系统, 并通过 TCP/IP 协议, 将水下机器人当前状态信息发送给水面监控系统, 以及将推力分配后的推力器电压指令通过 D/A 卡发送给推力器的电机系统。

(4) 紧急情况处理

主要包括在机器人的传感器或推力器出现故障的情况下, 根据故障的等级, 对水下机器人的作业情况进行适当的处理^[5]。

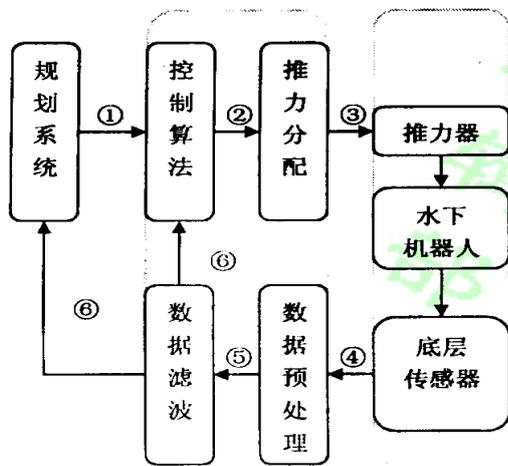


图 3 水下机器人运动控制系统的信息流

Fig.3 Information flow of the AUV's motion control system

在所有的任务中, 基础运动控制器是基础运动控制的核心, 下面将对其中的数据处理、控制方法以及推力分配进行详细的讨论。

4.1 数据处理

传感器数据的准确性对于水下机器人整个系统的正常运行是极其重要的。由于水下机器人运行环境复杂, 水声信号的噪声大, 而各种水声传感器普遍存在精度低、野点率高的缺点, 水下机器人滤波技术

就显得极为重要, 因此在对数据做平滑处理前, 需要先进行数据预处理, 剔除野点。

而对于数据平滑问题, 因为水下机器人运动缓慢, 不需要太高次数就可以得到很好的拟合效果。而五点二次平滑公式是简单实用的数据平滑公式。

令: $\hat{y}_i = a_0 + a_1 i + a_2 i^2 = \sum_{j=0}^2 a_j i^j$ 来拟合曲线, 其中 $i = -2, -1, 0, 1, 2$, 方差为:

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=-2}^2 (\hat{y}_i - y_i)^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=-2}^2 \left(\sum_{j=0}^2 a_j i^j - y_i \right)^2$$

使其达最小, 令 $\frac{\partial J}{\partial a_j} = 0, j = 0, 1, 2$, 得到五点二次平滑公式, 以最佳逼近曲线的右端点作为对位置的初步滤波值:

$$\hat{y}_{i+2} = (3y_{i-2} - 5.0y_{i-1} - 3y_i + 9y_{i+1} + 31y_{i+2})/35 \quad (1)$$

将初步滤波值与当前数据进行加权求和来获得水下机器人数据的滤波值。

4.2 推力分配

“智水-1V”号水下机器人的推力系统由 8 个推力器及相关元件组成。采用了两个导管推进器作为主推, 每个推进器的最大推力为 210N, 主要作为纵向推力。垂推和侧推都是采用槽道推进器, 根据水动力试验, 每个槽道推进器的最大推力大约为 88N。其中垂推 2 个, 主要用来控制垂向自由度的运动和纵倾角, 侧推则为 4 个, 主要用来控制横向自由度的运动和艏向角。

通过控制算法的计算, 得出水下机器人在每个自由度上由推力器提供的推力, 来进行推力分配。“智水-1V”号水下机器人主要是在保持纵倾角的情况下, 保证水下机器人在纵向自由度、横向自由度、垂向自由度和艏向自由度上的运动控制。对于横摇, 由于水下机器人的稳心高, 往往不考虑横摇角的控制。

对于纵向自由度, 为降低水下机器人推力分配的复杂程度, 假定纵向导管推进器的推力相同, 则有:

$$T = X / (2\cos \varphi) \quad (2)$$

其中 T 为每个导管推进器应发出的推力, φ 为纵向推力器的轴线方向与水下机器人中纵剖面的夹角, X 为水下机器人在纵向自由度上所应获得的推力。

横向和艏向的推力都是由水下机器人的侧向推力器来提供的, 所以这两个自由度是紧密联系在一起, 我们采用艏向寻优的算法来进行推力分配^[3]。

令 Y 为水下机器人在横向自由度上所应获得的推力, N 为水下机器人在艏向自由度上应获得的

摇艏力矩.同样假定艏部的两个侧推推力大小相同,艏部侧推亦然,则有:

$$\begin{cases} T_1 + T_2 + T_3 + T_4 = Y \\ T_1 L_1 + T_2 L_2 + T_3 L_3 + T_4 L_4 = N \\ T_1 = T_2 \\ T_3 = T_4 \end{cases} \quad (3)$$

一般而言,艏部两侧推的位置距离中横剖面是相同的,艏部也是一样,有:

$$\begin{cases} T_1 = T_2 = \frac{YL_3 + N}{2(L_1 + L_3)} \\ T_3 = T_4 = \frac{YL_1 - N}{2(L_1 + L_3)} \end{cases} \quad (4)$$

假定,推力器的最大推力为 T_{max} ,若 $|T_1| \leq T_{max}, |T_3| \leq T_{max}$,有:

$$T_1' = T_2' = T_1, \quad T_3' = T_4' = T_3$$

显然, T_1 和 T_3 之中必有一个在数值上大于另外一个,不妨设 $T_1 > T_3$,则根据艏向优先的原则:

若 $|T_3| > T_{max}$,则 $T_1' = T_3' = T_{max}$.

若 $|T_3| < T_{max} < |T_1|$,则有 $T_1' = T_{max}, T_3' = \frac{N - T_{max} L_1}{L_3}$.

由于垂向推力器也控制垂向与纵倾,所以也是采用上述推力分配的原则.

4.3 S面控制方法

由于水下机器人的非线性很强,采用的控制方法主要是神经网络和模糊逻辑控制.

我们采用一种简单实用的新型控制方法——S面控制,它基于模糊控制的思想,却借鉴了PID的简单结构,其算法如下^[4]:

$$\begin{cases} u_i = 2.0 / (1.0 + \exp(-k_{i1} e_i - k_{i2} \dot{e}_i)) - 1.0 + \Delta u_i \\ f_i = K_i u_i \end{cases} \quad (5)$$

其中, e_i 和 \dot{e}_i 为第 i 自由度控制的输入信息(偏差和偏差变化率,通过归一化处理), u_i 为第 i 自由度控制输出, k_{i1} 和 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, 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). Δu_i 为通过自适应方式得到的固定干扰力的大小(归一化).

水下机器人在纵向主要进行速度控制,在航速很高的情况下,推力器尤其是侧向推力器的推力减额尤其严重.为了解决这种情况,对S面控制进行改进如下:

$$\begin{cases} u_1 = 2.0 / (1.0 + \exp(-k_{11} e_1 - k_{12} \dot{e}_1)) - 1.0 \\ f_1 = \sum K_1 u_1 \\ u_i = 2.0 / (1.0 + \exp(-k_{i1} e_i - k_{i2} \dot{e}_i)) - 1.0 + \Delta u_i \\ f_i = K_i u_i \\ k_{ij} = \varphi(v_x) \quad (j=1, 2) \end{cases} \quad (6)$$

其中 $i=2, 3, \dots$, v_x 为水下机器人的纵向运动速度.其中函数 $\varphi(v_x)$ 的选择必须要有实际经验,它需要的是纵向速度 v_x 的增函数.试验中采用的是:

$$\varphi(v_x) = \lambda \exp(\alpha v_x^2) \quad (7)$$

其中 λ 为位置控制时的 k_{ij} ,而 α 为手工调节的参数,一般选择 3~5 左右.

5 试验结果与结论 (Experiment results and conclusions)

2003 年 10 月底到 11 月中旬,“智水-IV”号水下机器人在葫芦岛海区进行了基础运动控制试验和导航试验.试验场地选在水深 9~12m 的港湾,潮位落差有 4m,环境噪声很大.图 4(a)、(b)、(c)为基础运动控制试验,包括自动定向控制、自动定深控制与速度控制.

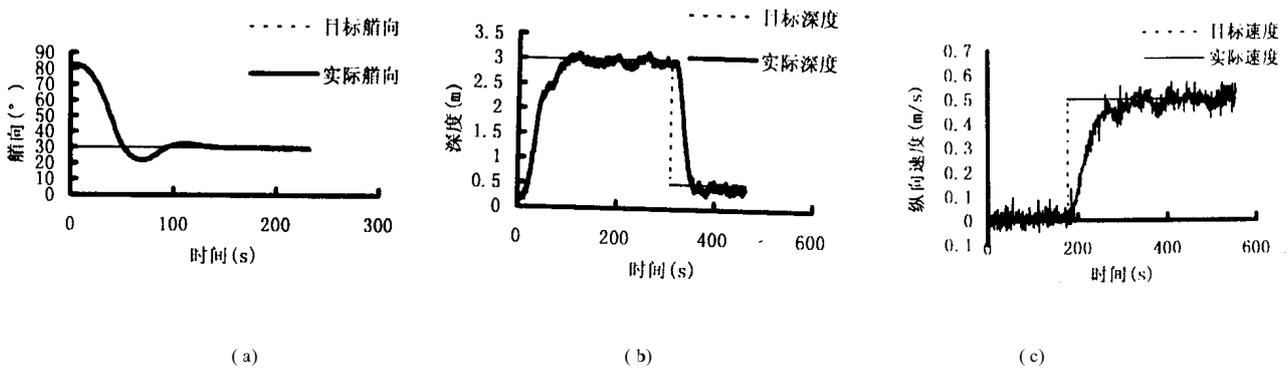


图 4 基础运动控制试验结果
Fig.4 Experiment results of the basic motion control