

基于实时多任务操作系统的分布式捷联姿态 基准姿态算法实现

朱欣华¹, 黄亮亮², 万德钧²

(1. 南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094 2. 东南大学 仪器科学与工程系, 江苏 南京 210096)

摘要: 随着舰船上的武器系统和观测系统的数量不断增多及对其的精度和可靠性等要求的不断提高, 对精确的局部姿态基准需求也不断增长。该文给出了用于消除大型舰船甲板变形给各战位点带来影响的分布式捷联姿态基准的结构, 讨论了分布式捷联姿态基准中基于实时多任务操作系统的姿态算法的实现方法, 包括: 实时多任务操作系统环境下组合式捷联姿态基准算法应用程序的多任务确定, 组合式捷联姿态基准算法中各任务的实现等。采用文中所述方法实现了一种实用的组合式捷联姿态基准算法, 算法的仿真结果证明了文中所述方法的正确性。

关键词: 分布式捷联姿态基准; 组合式捷联姿态基准算法; 实时多任务操作系统

中图分类号: V 249.32 **文章编号:** 1005-9830(2008)04-0453-05

Implementation of Attitude Algorithm in Distributed Strapdown Attitude Reference System Based on Real-time Multitask Operating System

ZHU Xin-hua, HUANG Liang-liang, WAN De-jun

(1. School of Mechanical Engineering, NUST, Nanjing 210094, China)

(2. Department of Instrument Science and Technology, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Due to the increasing number of weapon systems and observation systems for navy vessels and the better required performance, the number of separate attitude reference is also increasing. On the basis of putting forward the structure of distributed strapdown attitude reference system (DSARS) which is used to compensate the influence brought by the deck deformation of large scale navy vessels, the implementation of attitude algorithm in DSARS based on the real-time multitask operating system is discussed. The multitask establishment of the integrated strapdown attitude reference algorithm and the accomplishment of each task are included. A useful integrated strapdown attitude reference algorithm is realized by the way discussed here and the simulation result proves the correctness of the program method.

Key words: distributed strapdown attitude reference system; integrated strapdown attitude reference algorithm; real-time multitask operating system

收稿日期: 2006-05-15 修回日期: 2008-05-05

作者简介: 朱欣华(1963-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 导航制导与控制, 嵌入式系统与应用, MEMS惯性技术, E-mail: zhuxinhua@mail.njust.edu.cn

在大型舰艇的各战位点安装捷联姿态基准可消除甲板变形对舰载武器系统精度的影响,但这种处理方法会增加成本。为此,本文提出了建立全舰分布式捷联姿态基准系统的技术方案。这种方案的思路是:首先,利用分布地安装在舰船上的少量惯性测量单元(Inertial measurement unit MU)和综合信息处理装置,建立全舰分布式捷联姿态基准及变形补偿系统;然后,利用该系统为全舰甲板的各个战位点提供航行状态下的姿态基准等信息,补偿大中型水面舰船甲板变形造成的影响,从而提高各战位点武器系统的命中精度^[1-3]。所谓少量 MU是指并不是为每个战位点安排一个 MU而是采用分布式系统技术,在舰船上布置若干、但少于战位点数的局部基准以降低整个系统的成本。

提出的一种分布式捷联姿态基准的结构形式如图 1 所示。图中的 MU₁ ~ MU_n为大型舰船上根据需要布置的惯性测量单元,其输出分别由数据采集系统 DAS₁ ~ DAS_n进行采集,并通过 CAN 总线传送给导航计算机。而导航计算机与信息处理装置的数据交互通过以太网实现^[4]。为充分发挥导航计算机的强大性能并减少其数量以降低成本同时简化结构,图 1 中的每台导航计算机运行一套以上的导航算法。作为研究,图中每台导航计算机运行两套导航算法,即 $m = n/2$ ^[5]。这可使导航计算机的数量减少一半。

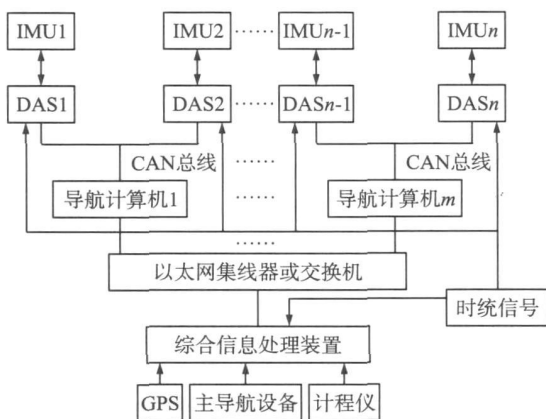


图 1 分布式捷联姿态基准结构

由于图中的每个导航计算机要运行一套以上的导航算法,同时还应具有 CAN 接口和以太网接口等,因此对导航计算机的要求很高。考虑到基于 X86 微处理器的 PC104 嵌入式计算机的综合性能优异,能满足系统对导航计算机的要求并能为系统功能今后的拓展留有余地,因此系统中的

导航计算机采用 PC104。

由于图 1 所示的系统结构相对复杂,因此对系统的可靠性、实时性要求很高。考虑到 VxWorks 在可靠性、实时性和可裁减性等方面具有突出的优点,是目前嵌入式系统领域中使用最广泛、市场占有率最高的操作系统,因此图 1 中导航计算机上配置的是 VxWorks 实时嵌入式操作系统。这样,通过合理划分任务和任务调度,不仅可以提高导航计算机系统的可靠性和实时性,而且还有利于系统软件的开发过程,可提高软件的开发效率、软件的可维护性及稳定性、软件的共享性和继承性。

本文讨论图 1 所示的分布式捷联姿态基准中各导航计算机在实时多任务操作系统环境下的组合式捷联姿态算法的实现方法。

1 组合式捷联姿态基准算法应用程序的多任务确定

为消除捷联姿态基准的误差随时间积累的影响而提高系统精度,图 1 中导航计算机上运行的是采用速度和航向角校正的组合式捷联姿态基准算法(航向角由舰上的主导航设备提供)^[5]。从宏观上看,算法的主要工作分为两个部分:(1)获取惯性仪表的输出数据,进行姿态计算,计算载体的姿态、速度和位置等信息;(2)获取从综合信息处理装置送来的由舰船上计程仪和平台罗经获得的速度和航向角信息,然后通过卡尔曼滤波估计捷联姿态基准的误差并进行误差校正而提高姿态基准的精度。

图 2 给出了组合式捷联姿态基准的功能模块和数据流。由图可看出,系统中导航计算机上实现的捷联姿态基准算法的具体功能可划分为:惯性仪表输出信号的采集、姿态阵计算、导航计算、卡尔曼滤波计算及用于校正的观测信息的读取等。并且,系统中每个导航计算机上运行两套组合捷联算法。图 2 虚线框中的内容是常规的捷联姿态基准算法(主要内容见本文 2 中的 (1))。图 2 中的卡尔曼滤波包括计算 F 矩阵 (12×12), 计算系统的转移矩阵 $\Phi_{k+1|k}$ 和 Q, 通过计算得到状态量: $\delta V_E, \delta V_N, \phi_E, \phi_N, \phi_U, \alpha, \beta, \nabla_{b_x}, \nabla_{b_y}, \epsilon_{b_x}, \epsilon_{b_y}, \epsilon_{b_z}$ 。

根据图 2 所示的数据流并结合任务划分原则^[6], 将一套组合式惯性捷联姿态基准算法划分为以下不同优先级的 5 个任务及两个中断。而两套

组合捷联算法功能相同的任务的优先级相同, 通过时间片轮转算法调度。对于在一台导航计算机上完成更多套算法的情况, 采用类似的处理方法。

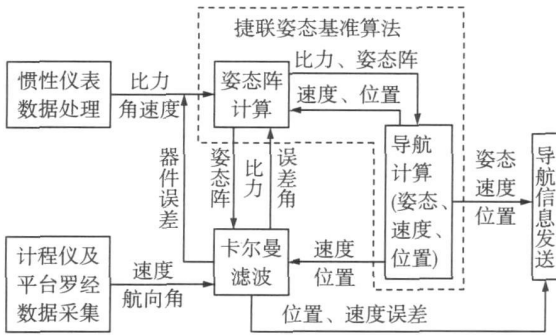


图 2 组合式捷联姿态基准的功能模块和数据流

任务 1 捷联姿态基准算法计算。根据载体的角速率和比力, 采用四元数法, 进行姿态矩阵计算, 利用卡尔曼滤波得到的状态量进行姿态角和速度的校正。任务周期为 10 ms。

任务 2 导航信息发送。该任务每隔 10 ms 将所有导航数据通过以太网向上一层设备传送。任务周期为 10 ms。

任务 3 卡尔曼滤波所需的 F 矩阵运算。根据姿态阵和比力、位置和速度, 计算得到 F 矩阵的累加和。任务周期为 10 ms。

任务 4 卡尔曼滤波计算。根据观测量数据和 F 矩阵计算 Q, 进而就可完成速度及航向角校正的卡尔曼滤波计算, 得到新的状态量。任务周期为 1 s。

任务 5 观测量数据的采集。通过以太网从上一层设备中读取计程仪、平台罗经的输出数据。任务周期为 1 s。

系统软件中还包括两个中断服务程序 (ISR), 它们是惯性仪表的数据采样和外部 10 ms 时钟中断。中断和任务之间通过信号量同步, 以达到实时的目的。

2 组合式捷联姿态基准算法中各任务的实现

为完成相关任务, 应为每个任务编写相关的代码。本文给出其中的捷联姿态基准算法的伪代码、数据采集中断服务程序以及整个算法的初始代码。

(1) 捷联姿态基准算法的伪代码

/姿态基准算法任务的入口函数:

```
void Cnb_Task( void data)
{
    四元数初始化;
    FOREVER
    {
        调用 semTake() 函数接收惯性仪表输出数据处理发送的信息; /角速度、比力
        if 20 ms 后没有收到惯性仪表的输出数据)
            发送出错消息给其他模块;
        else
        {
            调用 semTake() 函数接收卡尔曼滤波发送的信息; /平台误差角、惯性仪表误差
            利用四元数法求解姿态阵;
            计算速度和位置;
            对姿态阵和速度进行补偿;
            计算姿态角;
            调用 semGive() 函数给 F 矩阵计算发送信息; /姿态阵、位置、速度、比力
        }
    }
}
```

(2) 数据采集中断服务程序伪代码

/*读取惯性仪表采样值不是一个任务而是一中断处理函数, 它由导航计算机的外部设备 (CAN卡) 每 10 ms 产生一次中断。该函数的功能主要是读取两套算法所需的惯性仪表采样值, 它们是通过两套数据采集设备分别对与其相应的 MU 进行采样获得的 (通过 CAN 总线发往导航计算机); 之后服务程序将角速度和比力的值分别传递给两套不同算法的捷联姿态基准算法计算模块, 由该模块根据各自的卡尔曼滤波输出的惯性仪表误差进行补偿。*/

```
void wf_ISR ( void)
{
    读角速度和比力信息
    调用 semGive() 函数给一个捷联姿态基准算法计算模块发送信息; /角速度、比力
    调用 semGive() 函数给另一个捷联姿态基准算法计算模块发送信息; /角速度、比力
}
```

(3) 整个算法的初始代码

```
void naviprogram ( void)
```

```

{
姿态计算的初始化; //四元数, 姿态矩阵
卡尔曼滤波的初始化; //P Q R
创建各信号量;
将中断服务程序与中断向量表关联;
开中断;
发起各任务;
}

```

3 组合式捷联姿态基准算法实现方法的仿真测试

3.1 仿真测试条件

3.1.1 仿真轨迹及误差设定

按照大型舰船可能出现的相对较恶劣的运行情况, 确定摇摆状态下描述载体运动状态的相关参数如下:

$$\dot{V} = [V \ 0 \ 0] = [6 \ 0 \ 0]$$

$$\begin{cases} \varphi = \varphi_0 + A \sin(\omega_\varphi t) = 45 + 7.5 \sin(2\pi t/8) \\ \theta = \theta_0 + A \sin(\omega_\theta t) = 15 \sin(2\pi t/9.2) \\ \gamma = \gamma_0 + A \sin(\omega_\gamma t) = 5 \sin(2\pi t/6) \end{cases}$$

仿真时相关误差设定如下:

(1) 惯性仪表的输出和相关量测信号的选取
陀螺仪: 真值 $+0.05^\circ/h$ + 方差为 $(0.05^\circ/h)^2$ 的白噪声;

加速度计: 真值 $+50 \mu g$ + 方差为 $(50 \mu g)^2$ 的白噪声;

计程仪: 真值 + 方差为 $(0.01 \text{ m/s})^2$ 的白噪声;

平台罗经: 真值 + 方差为 $(0.03^\circ)^2$ 的白噪声。

上述各项中真值的获取方法可参阅文献 [7]。

(2) 初始失准角

一个导航计算机上运行的两套算法在仿真时共享同一套模拟舰船运行轨迹的数据, 只在初始失准角的设置时作了两种不同的假设: 一套导航

算法的航向角、纵摇角和横摇角的初始失准角均设为 0.15° ; 另一套则均设为 -0.15° 。

3.1.2 滤波初始条件

根据 3.1.1 中 (1) 的假设, 卡尔曼滤波初始条件如下。

状态初始值取为零, 即

$$X_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

是

$$X = [\delta V_E \ \delta V_N \ \phi_E \ \phi_N \ \phi_U \ \delta L \ \delta \nabla_{bx} \ \delta \nabla_{by} \ \epsilon_{bx} \ \epsilon_{by} \ \epsilon_{bz}]^T \text{ 的初值。}$$

滤波协方差阵 P_0 和 Q 矩阵采用的初始值为

$$P_0 = \text{diag}\{ (0.1 \text{ m/s})^2, (0.1 \text{ m/s})^2, (1.5^\circ)^2, (1.5^\circ)^2, (1.5^\circ)^2, (0.00254^\circ)^2, (0.00446^\circ)^2, (100 \mu g)^2, (100 \mu g)^2, (0.5^\circ/h)^2, (0.5^\circ/h)^2, (0.5^\circ/h)^2 \}$$

$$Q = \text{diag}\{ (50 \mu g)^2, (50 \mu g)^2, (0.05^\circ/h)^2, (0.05^\circ/h)^2, (0.05^\circ/h)^2, (50 \mu g)^2, (50 \mu g)^2, 0 \ 0 \ 0 \ 0 \}$$

速度和航向角为观测量时的 R 矩阵取为

$$R_v = \text{diag}\{ (0.01 \text{ m/s})^2, (0.01 \text{ m/s})^2, (0.03^\circ)^2 \}$$

3.2 仿真测试内容及结果

基于上面讨论的内容在 PC104 加 VxWork 操作系统的嵌入式环境中进行了仿真测试, 除惯性仪表的输出数据是仿真的外, 其他所有过程都与实际一致。仿真测试结果分别用图 3、图 4 和图 5 及图 6、图 7 和图 8 表示。它们分别为一台导航计算机上运行的两套组合式惯性捷联姿态基准算法计算出的两个捷联姿态的航向角误差 (EH) 曲线、横摇角误差 (EP) 曲线和纵摇角误差 (ER) 曲线。图中波动幅度较大的是原始误差曲线, 较平的是闭环校正后的误差曲线。这些曲线与相同条件下在一台导航计算机上用 C 语言编写一套导航算法时 (即以前常规的处理方法) 得到的仿真曲线一致。

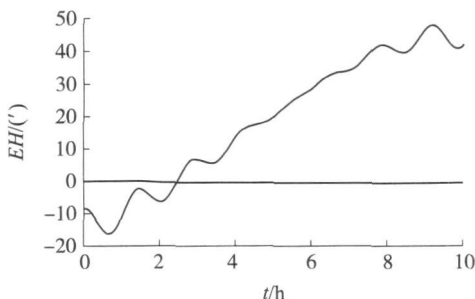


图 3 MU1 航向角误差

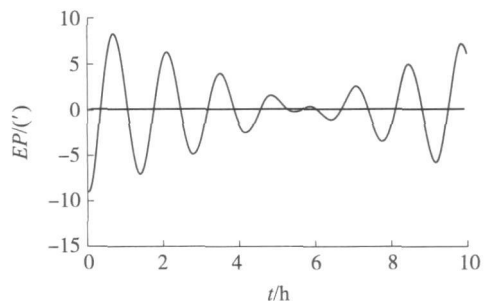


图 4 MU1 横摇角误差

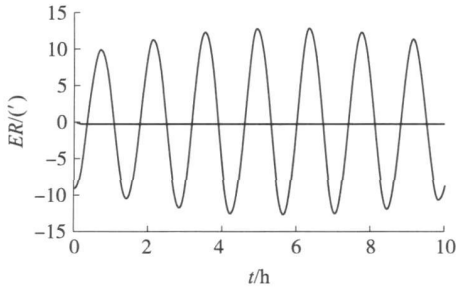


图 5 IMU1 纵摇角误差

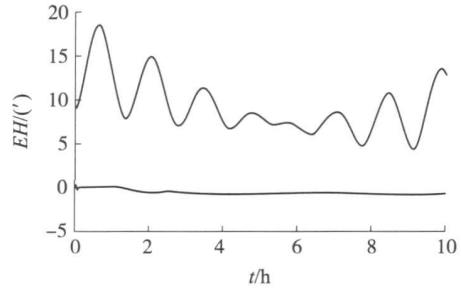


图 6 IMU2 航向角误差

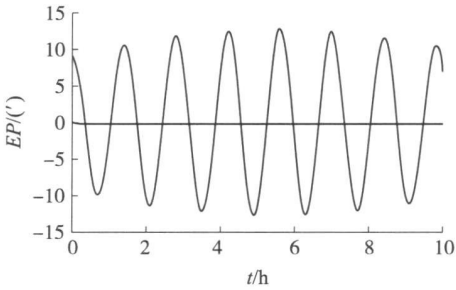


图 7 IMU2 横摇角误差

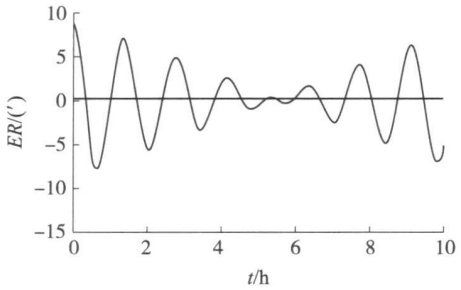


图 8 IMU2 纵摇角误差

4 结束语

由仿真结果可得出如下结论:

(1) 利用本文介绍的在实时多任务操作系统环境下按照多任务程序设计思想实现组合式捷联姿态基准算法的方法是正确的;

(2) 建立的 PC104 加 VxWorks 操作系统的嵌入式环境工作可靠, 能实现在一台导航计算机上运行一套以上组合式惯性捷联姿态基准算法的设想, 从而使图 1 所示的结构能够应用于分布式捷联姿态中。采用该结构除可减少导航计算机的数量以降低成本、简化结构外, 还可以实现导航计算机冗余等, 以提高系统的可靠性。

参考文献:

[1] 程向红, 万德钧. 分布式系统中捷联惯性系统动基

座对准研究 [J]. 中国惯性技术学报, 2004 12(6): 8-12

[2] 裴福俊, 万德钧. 一种基于应变模态分析的舰船分布式挠曲姿态测量方法 [J]. 中国惯性技术学报, 2005 13(1): 15-20

[3] Baldwin C, Mijm czuk J, Kildy J. Structural testing of navy vessels using Bragg gratings and a prototype digital spatial wavelength domain multiplexing system [J]. AVAL Engineers Journal 2002 114: 63-70

[4] 朱欣华, 夏云翔, 万德钧. 分布式捷联基准中数据采集系统的设计 [J]. 传感技术学报, 2006 19(3): 741-745

[5] 朱欣华. 嵌入式计算机系统在分布式捷联姿态基准中的应用研究 [D]. 南京: 东南大学仪器科学与工程系, 2005

[6] 罗国庆. VxWorks 与嵌入式软件开发 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 31-37

[7] 朱欣华, 施朝晖, 万德钧. 一种分析 SNS 导航性能的新方法 [J]. 仪器仪表学报, 2001 22(2): 207-209