

INS/GPS 组合导航系统卡尔曼滤波的并行实现*

陈一虹 颜 东 张洪钺

(北京航空航天大学自动控制系·北京,100083)

摘要: 本文采用并行处理技术对 INS/GPS 组合导航系统中卡尔曼滤波的实时性问题进行了研究. 根据并行结构设计的原则, 设计了卡尔曼滤波的并行结构, 并分别在 Transputer 晶片机上实现双机、三机和六机的并行协方差卡尔曼滤波. 通过对各种并行结构的效率分析可以看出, 采用并行技术来解决组合导航系统中卡尔曼滤波的实时性, 是一种十分有效的方法.

关键词: 卡尔曼滤波; 并行处理; 组合导航

1 引言

卡尔曼滤波是一种线性、无偏的最小方差的状态估计器, 因此在信号处理、通信和控制等领域得到广泛的应用. 在导航领域, 卡尔曼滤波器同样起着极其关键的作用. 然而, 由于系统模型和测量模型的维数比较高, 例如: 捷联惯性导航系统 (SINS) 和全球定位导航系统 (GPS) 组合后的模型阶数一般是 18 维的, 甚至可以是 48 维的. 因此, 卡尔曼滤波的计算量比较大, 这样便会遇到卡尔曼滤波实时性问题.

为了解决卡尔曼滤波的实时性问题, 一般可以采用如下几种可行的办法^[1]. 首先, 可能通过算法上的分解和简化, 从而减少计算量. 但这种方法有可能会降低滤波精度. 其次, 可以通过提高硬件速度的方法来提高系统信息处理能力, 但硬件速度的提高要受到材料、工艺和技术水平的约束, 并不是没有限制的. 近些年来, 随着计算机技术的发展, 产生了适于并行处理的芯片, 如英国 INMOS 公司设计的 Transputer 晶片机以及美国 Texas 仪器公司生产的 TMS320C40 芯片, 通过采用以互连网络为中心的结构, 为实现并行处理计算奠定了强有力的硬件和软件的基础, 为解决卡尔曼滤波的实时处理开辟了广阔的前景.

本文正是利用并行技术来解决在组合导航系统中的卡尔曼滤波的实时性的问题, 我们分别在二个、三个和六个 Transputer 上实现了 INS/GPS 组合导航系统的协方差卡尔曼滤波, 实验结果表明: 采用并行处理技术来提高卡尔曼滤波的速度, 具有较大的实用性.

2 几种并行卡尔曼滤波的并行结构

设有如下的离散系统

$$x(k+1) = \varphi(k)x(k) + \omega(k), \quad (1)$$

$$z(k) = H(k)x(k) + v(k). \quad (2)$$

其中 $x(k)$ 为 n 维的状态向量, $z(k)$ 为 m 维的观测向量, $\omega(k)$ 为 n 维的系统噪声向量, $v(k)$ 为 m 维的观测噪声向量. $v(k)$ 和 $\omega(k)$ 为互不相关的高斯白噪声向量, 其协方差阵分别为 $R(k)$ 和 $Q(k)$.

根据文献[2], 可以得到设计并行结构的一般规则:

* 高校博士点基金资助项目.

本文于 1995 年 10 月 4 日收到. 1996 年 6 月 18 日收到修改稿.

1) 在对并行处理器分配计算任务时,要尽可能地使每个处理器的计算任务相同,这样就可以减少等待时间.

2) 处理器间的通信要尽可能的少,处理器间的通信时间包括传送数据的时间和初始化 Transputer 连接器的时间.一般来说,初始化 Transputer 连接器的时间比较长,所以应尽可能地减少通信次数.通常采用的方法是:减少通信次数,扩大每次传送的数据量.

2.1 双机卡尔曼滤波的并行结构

双机并行的卡尔曼滤波实际上是一种任务分解的方法,它把卡尔曼滤波分为相对独立的两部分,分别在两个 Transputer 上运行,它的并行结构如图 1 所示.

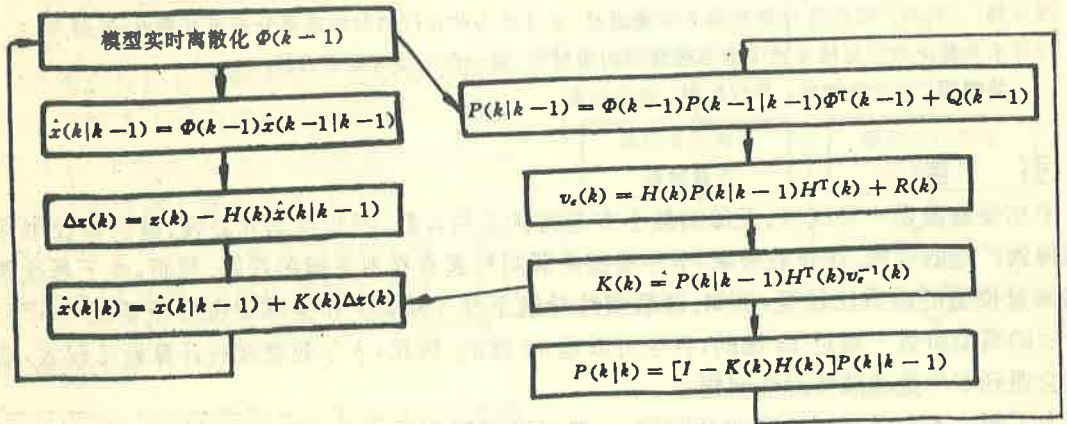


图 1 双机协方差滤波的并行结构

从图 1 中可以看出,左边的 Transputer 完成离散化 $\Phi(k-1)$ 和状态 $\hat{x}(k|k)$ 的更新,右边的 Transputer 完成协方差阵 $P(k|k)$ 的更新,从结构上看,两边的计算任务基本均衡,通信次数比较少,在一个滤波周期只通信两次.因此符合并行设计规则.

2.2 三机卡尔曼滤波的并行结构

从上述的滤波公式可以看出,在滤波计算过程中,主要使用的是矩阵相乘和相加的运算,因此可以采用矩阵分解的方法来实现并行卡尔曼滤波.

具体的分解方法为:

对于矩阵相乘运算 $A \times B$,则可以把 A 按行分为维数相等的 n 部分 A_1, A_2, \dots, A_n ,则 $A \times B$ 可以表示为:

$$A \times B = \begin{bmatrix} A_1 B \\ A_2 B \\ \vdots \\ A_n B \end{bmatrix} \quad (3)$$

用一个 Transputer 完成某一个 $A_i B$ 的运算, $i=1, 2, \dots, n$. 这样,用 n 个 Transputer 可以完成整个矩阵相乘的运算.

对于矩阵相加,我们只需要这样进行分解.把 A 按行分解为维数相等的 n 部分, A_1, A_2, \dots, A_n ; 把 B 按行分解为维数相等的 B_1, B_2, \dots, B_n , 其中 A_i 和 B_i 的大小相等,则 $A+B$ 可以表示为:

$$A + B = \begin{bmatrix} A_1 + B_1 \\ A_2 + B_2 \\ \dots \\ A_n + B_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

用一个 Transputer 完成某一个 $A_i + B_i$ 的运算, $i = 1, 2, \dots, n$. 则用 n 个 Transputer 可以完成整个矩阵相加的运算.

由于每一个 A_i 和 B_i 的大小相等, 所以分配到每一个 Transputer 的矩阵加法的计算量基本相等.

这里我们以 $n = 3$ 为例在 Transputer 上加以实现.

2.3 六机卡尔曼滤波的并行结构

此方法是综合上述两种并行结构, 先把 $2n$ 个 Transputer 分为两组, 一组用来执行图 1 的左半部分的任务, 另一组用来执行图 1 的右半部分的任务然后对于每一组中的 n 个 Transputer, 再按照 2.2 所介绍的方法, 把滤波的每一步进行矩阵分解. 从结构上看, 分配到每个 Transputer 的任务基本相等.

这里我们以 $2n = 6$ 为例在 Transputer 上加以实现.

3 INS/GPS 组合导航系统协方差滤波的并行实现

在这里以 INS/GPS 组合导航系统的卡尔曼滤波为例, 对以上几种并行结构进行了并行实现.

这里使用 18 个状态误差模型来描述组合以后的系统的误差. 状态变量为

$$x^T = [r_e, r_n, r_u, v_e, v_n, v_u, \varphi_e, \varphi_n, \varphi_u, \nabla_x, \nabla_y, \nabla_z, \epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \delta_e, \delta_n, \delta_u].$$

其中, r_e, r_n, r_u 为位置误差, v_e, v_n, v_u 为速度误差, $\varphi_e, \varphi_n, \varphi_u$ 为平台误差角, $\nabla_x, \nabla_y, \nabla_z$ 为加速度计偏置, $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ 为陀螺马尔可夫误差, $\delta_e, \delta_n, \delta_u$ 为 GPS 的马尔可夫误差, 经过推导^[3], 系统方程为

$$\dot{x} = Fx + Gw.$$

其中 F, G 和 w 的表达式可见文献[7].

测量方程为:

$$z = Hx + n.$$

其中

$$H = [I_{3 \times 3} \quad O_{3 \times 12} \quad -I_{3 \times 3}], \quad z^T = [z_1 \quad z_2 \quad z_3], \quad n^T = [-n_e \quad -n_n \quad -n_u].$$

这里选择了一条简单的飞行轨迹, 从北纬 40 度开始, 以 400 公里/小时的速度, 由南向北平飞.

4 实现结果

图 2 给出了 INS/GPS 组合导航系统在东向的位置误差和估计值的曲线.

从图 2 中可以看出, 东向位置误差和它的估计值的曲线重合, 因此, 估计值跟踪上了真实值的变化.

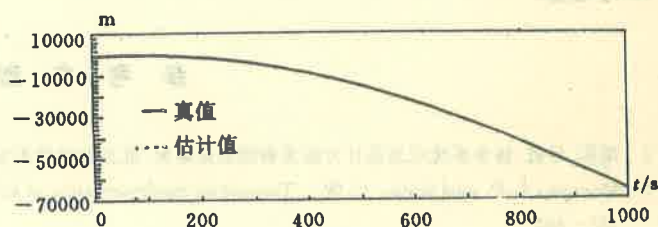


图 2 东向位置误差和估计值

5 结果分析

为了评价并行算法的优劣, 可以

用加速比 S_p 和效率 E_p 来衡量. 加速比 S_p 和效率 E_p 的定义见文献[5].

表 1 给出了二个、三个和六个 Transputer 的加速比 S_p 和效率 E_p [7].

表 1 并行结构的并行指标

	双机	三机	六机
加速比	1.8979	2.3927	3.3031
效率	0.9489	0.7976	0.5505

从表 1 中可以看出,随着 Transputer 个数的增加,加速比不断提高,而加速比反映的是并行算法对计算时间的改进程度. 所以采用并行技术来提高卡尔曼滤波的速度是完全可行的.

另一方面,随着 Transputer 个数的增加,执行效率在不断下降. 这主要是因为:

当状态方程的阶数确定后,总的计算量也就相应确定. 而并行卡尔曼滤波的时间主要是由两部分构成的:完成计算所用的时间和相互通信占用的时间. 在任务分配均衡的情况下,效率实际上反映的是计算时间与通信时间之比,通信所占的时间越少,并行的效率越高. 随着 Transputer 个数的增加,分配给每个 Transputer 的计算量减少,因此计算时间会减少,而相互通信的时间由于 Transputer 的增加而略有增加. 因此,效率随着并行度的增加而下降.

对于双机并行卡尔曼滤波,由于两个模块相对比较独立,通信次数少,所用 Transputer 较少,因此效率很高. 而如采用矩阵分解方法,由于矩阵分块的个数是可以变化的,所以 Transputer 的个数也是可以变化的,可根据具体的实时性要求来确定 Transputer 的个数.

总之,对于卡尔曼滤波,其计算复杂性为 $O(n^3)$, 因此实时性问题主要是针对较高维数的状态方程来说. 所以,维数越高,计算时间愈长,如采用并行方法,当并行度相同,其计算时间与通信时间之比越高,效率越高. 因此,状态方程的维数越高,并行效果也越明显.

这里我们给出了在一个,二个,三个和六个 Transputer 上运行一次 18 维卡尔曼滤波的时间 [7], 如表 2 所示.

表 2 并行结构和运行时间

	串行	双机	三机	六机
时间(s)	0.4388	0.2312	0.1834	0.1328

6 结 论

通过对双机、三机以及六机的并行卡尔曼滤波的实现可以看出,采用并行技术可以缩短 INS/GPS 组合导航系统的滤波周期,从而可以有效地解决组合导航系统的实时数据处理问题.

感谢 本文的研究得到清华大学计算机系统与应用实验室的支持与帮助,在此表示深深的谢意.

参 考 文 献

- 1 颜东. 导航、制导系统状态估计方法及容错理论研究. 北京航空航天大学博士学位论文, 1995年6月, 88—100
- 2 Maguire, L. P. and Irwin, G. W.. Transputer implementation of kalman filters. IEE Proceedings, Pt. D., 1991, 138(4): 355—362
- 3 Itzhack, Y. Bar-Itzhack and Medan, Y.. GPS aided cost strapdown INS for attitude determination, AIAA 86-2149, 516—521
- 4 颜东, 陈一虹, 晏磊, 张洪铤. 改进的协方差/信息滤波并行结构及其在 INS/GPS 组合导航系统的应用, 1995, 31(1): 99—

105

- 5 张志勇,王诗宓,方崇智,康景利. 并行自适应控制算法及双处理机实现. 自动化学报,1995,21(1):110—115
- 6 张友民,戴冠中,张洪才. 并行卡尔曼滤波及其心动阵列实现综述. 控制理论与应用,1993,10(1):3—12
- 7 陈一虹. 导航系统的仿真及实时性研究. 北京航空航天大学自动控制系学位论文,北京,1996.3,52—68

Parallel Implementation of Kalman Filter for Integrated INS/GPS Navigation System

CHEN Yihong, YAN Dong and ZHANG Hongyue

(Department of automatic Control, Beijing University of Aeronautics and Astronautics • Beijing, 100083, PRC)

Abstract: In this paper, the real time implementation of Kalman filter for integrated INS/GPS navigation system is studied. According to general parallel design principle, parallel covariance Kalman filter using two, three and six Transputers were realized. From the result, we can see that the problem of the real time implementation of Kalman filter for integrated INS/GPS navigation system can be solved efficiently.

Key words: covariance Kalman filter; parallel processing; integrated navigation system

本文作者简介

陈一虹 1970年生, 1996年获北京航空航天大学自动控制系硕士学位, 现在清华大学电子工程系工作. 研究方向为组合导航, 并行处理.

颜东 1966年生, 1995年获得北京航空航天大学自动控制系博士学位, 现在清华大学精密仪器系做博士后研究工作. 研究方向有组合导航, 最优滤波, 并行计算, 故障检测与诊断技术等.

张洪铨 1936年生, 1958年毕业于北京航空学院, 现任北京航空大学自动控制系教授, 博士生导师. 研究方向有惯性导航与组合导航, 故障检测与诊断技术, 系统辨识, 状态估计, 人工智能的应用等.