

# 基于联合卡尔曼滤波的多传感器信息 融合算法及其应用

崔平远, 黄晓瑞

(哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**针对常规卡尔曼滤波器在处理多传感器组合系统的数据时,存在计算量大和故障数据相互污染的问题,提出了一种应用联合卡尔曼滤波技术进行多传感器信息融合,以求得参数最优估计的方法。文中首先对联合卡尔曼滤波的基本原理和4种主要结构方式进行了论述和分析,然后给出了融合算法的实现,最后以多传感器组合导航系统为例,对其进行计算机仿真。结果表明:该方法可有效提高计算的精度和可靠性,具有较好的容错性和环境适应性,有较高的工程实用价值。

**关键词:**联合卡尔曼滤波; 信息融合; 组合导航

中图分类号: TP13, V666.11

文献标识码: A

文章编号: 1007-449X(2001)03-0204-04

## Multi-sensor information fusion algorithm based on federal Kalman filter and its application

CUI Ping-yuan, HUANG Xiao-rui

(Department of Astronautic Engineering and Mechanics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** In view of the heavy calculation and fault-data spread in multi-sensor integrated system when using general Kalman filter, a new method of optimum parameter estimate based on information fusion by means of federal Kalman filter is presented. Firstly, the basic principle and four frames of the federal Kalman filter is introduced, then the algorithm is given. Simulation results show this method is very useful in project because it can improve accuracy and reliability, at the same time it has high fault-tolerant and adaptive ability.

**Key words:** federal Kalman filter; information fusion; integrated navigation

### 1 引言

近10年来,随着现代数学、现代控制理论、计算机技术和传感器技术以及各种复杂系统的迅速发展,多传感器数据集成和信息融合技术也取得了长足的进步,人们开始更多地意识到各种单一传感器在使用中的种种限制和不尽人意之处,并将目光转向多传感器信息融合,希望从多传感器信息融合的角度来增强系统对周围环境的认识能力。然而传感器的

增多又给数据处理带来了许多困难,采用常规的单一卡尔曼滤波器对多传感器组合系统进行数据处理时,存在很多严重的问题<sup>[1]</sup>,例如:(1)在组合信息大量冗余的情况下,计算量将以滤波器维数的三次方剧增,实时性不能保证;(2)传感器子系统的增加使故障率也随之增加,在某一子系统出现故障而又没有及时被检测出并隔离掉的情况下,故障数据会污染整个系统,使可靠性降低。为了解决这一矛盾,Speyer, Berma及Kerr<sup>[2,3]</sup>等人先后提出了分散滤波

收稿日期: 2000-02-24; 修回日期: 2000-09-01

作者简介: 崔平远(1961-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为非线性控制、神经网络分析与建模、信息融合等;

黄晓瑞(1971-),女,哈尔滨理工大学电气与电子工程学院讲师,哈尔滨工业大学航天工程与力学系博士研究生,主要研究方向为信息融合、GPS全球定位系统、组合导航等。

思想,但都存在着信息量太大、在融合中心需要考虑各局部状态估计解的相关性等实际操作困难.本文根据 N A Carlson<sup>[4, 5]</sup>提出的联合滤波理论,给出了一种用于多传感器组合系统的信息融合算法,并对 INS/GPS/CNS 组合导航系统进行了分析、建模和仿真。

## 2 联合卡尔曼滤波原理与结构

### 2.1 问题描述

对于线性定常多传感器组合系统,可用如下的离散形式来描述

$$X(k+1) = \Phi(k+1, k)X(k) + \Gamma(k)W(k)$$

式中:  $X(k)$  为系统的状态变量;  $\Phi(k+1, k)$  为状态的一步转移矩阵;  $\Gamma(k)$  为系统噪声矩阵;  $W(k)$  为零均值白噪声序列,且有  $E[W(k)W^T(j)] = Q\delta(k, j)$ 。

设有  $N$  个传感器对系统进行独立观测,相应应有  $N$  个局部滤波器,每个滤波器均可独立完成滤波计算.设第  $i$  个局部滤波器的模型为

$$X_i(k+1) = \Phi(k+1, k)X_i(k) + \Gamma(k)W(k)$$

$$Z_i(k+1) = H_i(k+1)X_i(k+1) + V_i(k+1)$$

式中:  $Z_i(k)$  为第  $i$  个传感器的观测量;  $H_i(k)$  为第  $i$  个传感器的观测矩阵;  $V_i(k)$  为独立于  $W(k)$  的零均值白噪声序列,且有  $E[V_i(k)V_i^T(j)] = R\delta(k, j)$ ,  $R(k) > 0$ 。

### 2.2 基本原理

联合卡尔曼滤波器是一种分块估计、两步级联数据处理技术.联合滤波的思路就是先分散处理,再全局融合.在联合滤波中,子系统包括外部传感器 1、传感器 2 …… 传感器  $N$ , 标准的卡尔曼滤波器分别对应于不同传感器,形成多个局部滤波器,每个局部滤波器并行工作,并通过全局滤波器进行信息综合、顺序处理,并对所有的局部输出产生的滤波结果进行信息融合,给出全局最佳状态估计.在通常情况下,联合滤波可以大大降低计算量,应用灵活方便,具有高水平的故障检测、隔离、重构能力。

可以看出,联合滤波器实际上就是一种特殊的分散滤波方法,需要向各局部滤波器分配动态信息,这些信息主要包括两大类:运动状态方程的信息和观测方程的信息.具体过程如下:① 把整个系统的信息适当地分配到各局部滤波器中;② 各局部滤波器单独工作,将分配后的信息与量测信息融合,进行时间修正和观测量修正,完成局部滤波器的信息更新;③ 把修正后的局部信息融合成一个新的全局状态估计。

### 2.3 结构分析

根据“信息分配”方法的不同,即信息分配因子  $\beta_i$  ( $i=1, \dots, N, m$ ) 的取值不同.联合滤波器将具有不

同的结构<sup>[6]</sup>.图 1 所示为一般情况下的联合卡尔曼滤波结构图.下面针对联合滤波的四种主要结构分别描述如下:

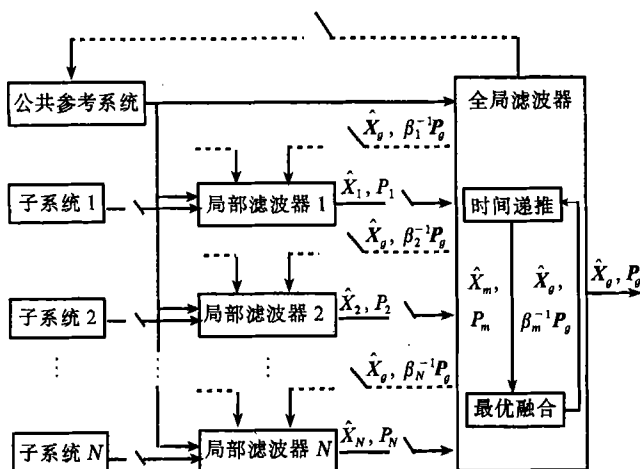


图 1 一般联合卡尔曼滤波的结构示意图

Fig. 1 Structure of federal Kalman Filter

#### (1) 无复位 (No-Reset) 结构

各个局部滤波器持有自身的全部信息,输出由时间更新和量测更新确定,具有记忆功能.而全局滤波器的输出仅由时间更新确定,也就是说,只对输入信息进行融合处理但并不保留这些信息,对局部滤波器没有反馈.这种方式虽然精度较差,但换来的是容错鲁棒性,也称之为容错联合滤波结构。

#### (2) 零复位 (Zeros-Reset) 结构

全局主滤波器具有长期记忆功能,保留全部融合信息.而各局部滤波器向全局滤波器提供的是自从上一次发送数据后所得到的新信息,按公共状态的估计误差方差无穷大(即零信息)的情况处理,全局滤波器可以不同时地处理各局部滤波器的数据.对局部滤波器没有反馈,这种结构实现起来比较简单。

#### (3) 融合复位 (Fuse-Reset) 结构

全局主滤波器在每一次融合计算以后都要反馈分配信息,各局部滤波器在工作之前要等待从全局滤波器来的反馈信息,这种结构因为具有反馈作用,使精度提高,但信息相互传播的同时,故障也通过相同途径传播,因此容错能力下降。

#### (4) 重调 (Rescale) 结构

在进行信息融合时,局部滤波器只向全局滤波器提供部分信息,而自己保留剩余的另一部分信息,融合完成以后,各局部滤波器将原有的状态估计值和方差都扩大剩余信息的倒数倍后作为滤波初值,再进行下一个周期的滤波。

### 3 基于联合卡尔曼滤波器的信息融合算法

信息融合的目的就是将各个局部滤波器的估计信息按一定方式进行分析与综合,以得到全局最优估计。因此,基于联合卡尔曼滤波的融合算法设计是信息融合技术的核心内容<sup>[7,8]</sup>。记局部滤波器*i*的状态估计矢量、系统协方差阵、状态矢量协方差阵分别为: $\hat{X}_i, Q_i, P_i, i=1, \dots, N$ ;全局滤波器相应为: $\hat{X}_m, Q_m, P_m$ 。则联合滤波器的计算过程如下。

(1) 给定初始值:假设在起始时刻全局状态的初始值为 $X_0$ ,其协方差阵为 $P_0$ ,系统协方差阵为 $Q_0$ 。将这一信息通过信息分配因子按以下规则分配到各局部滤波和全局滤波器。

$$\begin{aligned} Q^{-1} &= Q_1^{-1} + Q_2^{-1} + \dots + Q_N^{-1} + Q_m^{-1} & Q_i^{-1} &= \beta_i Q^{-1} \\ P^{-1} &= P_1^{-1} + P_2^{-1} + \dots + P_N^{-1} + P_m^{-1} & P_i^{-1} &= \beta_i P^{-1} \\ P^{-1} \hat{X} &= P_1^{-1} \hat{X}_1 + P_2^{-1} \hat{X}_2 + \dots + P_N^{-1} \hat{X}_N + P_m^{-1} \hat{X}_m \\ i &= 1, 2, \dots, N \end{aligned}$$

其中, $\beta_i$ 必须满足信息守恒原则: $\beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_N + \beta_m = 1, 0 \leq \beta_i \leq 1$ 。

(2) 信息的量测更新:第*i*个局部滤波器的量测更新为

$$\begin{aligned} P_i^{-1}(k+1/k+1) \hat{X}_i(k+1/k+1) &= P_i^{-1}(k+1/k) \hat{X}_i(k+1/k) + H_i^T(k+1) R_i^{-1}(k+1) Z_i(k+1) \\ P_i^{-1}(k+1/k+1) &= P_i^{-1}(k+1/k) + H_i^T(k+1) R_i^{-1}(k+1) H_i(k+1) \quad i=1, 2, \dots, N. \end{aligned}$$

(3) 信息的时间更新

$$\begin{aligned} \hat{X}_i(k+1/k) &= \Phi(k+1, k) \hat{X}_i(k) \\ P_i(k+1/k) &= \Phi(k+1, k) P_i(k/k) \Phi^T(k+1, k) + \Gamma(k+1, k) Q_i(k) \Gamma^T(k+1, k) \end{aligned}$$

$i=1, 2, \dots, N, m$ 。

(4) 最优信息融合

$$\begin{aligned} \hat{X}_g &= P_g \sum_{i=1}^N P_i^{-1} \hat{X}_i \\ P_g &= \left( \sum_{i=1}^N P_i^{-1} \right)^{-1}. \end{aligned}$$

### 4 仿真研究

本文以惯性导航系统(INS)、全球定位系统(GPS)和天文导航系统(CNS)三者的组合为例,对上述联合卡尔曼滤波算法进行了计算机仿真。以INS作为公共参考子系统,GPS、CNS作为辅助子系统,则整个系统包含两个子组合系统:INS/GPS和INS/CNS。如图2所示。

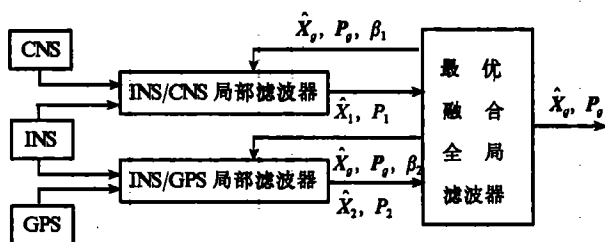


图2 INS/GPS/CNS组合导航系统结构框图

Fig. 2 Structure of INS/GPS/CNS integrated navigation system

#### 4.1 状态变量的选取

组合系统整体状态方程为: $\dot{X} = \Phi X + GW$

我们选取导航系统的参数误差作为状态向量,对于惯导系统取为 $[\delta r \ \delta v \ \Psi \ \varepsilon \ \nabla]$ ,共15维。其中 $\delta r = (\delta x \ \delta y \ \delta z)^T$ 为三维位置误差, $\delta v = (\delta v_x \ \delta v_y \ \delta v_z)^T$ 为三维速度误差, $\Psi = (\Psi_x \ \Psi_y \ \Psi_z)^T$ 为三维平台失调角误差; $\varepsilon = (\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z)^T$ 为三维陀螺漂移; $\nabla = (\nabla_x \ \nabla_y \ \nabla_z)^T$ 为三维加速度计漂移。因为采用GPS和CNS的基本观测量作为量测修正信息,故应将GPS接收机的时钟偏差 $\Delta t$ 和钟偏漂移 $\delta t$ (假设钟漂是一阶Markov过程)以及CNS系统的星象漂移 $\delta\theta = (\delta\theta_x \ \delta\theta_y \ \delta\theta_z)^T$ 扩充在惯性系统的状态向量中,形成20维组合系统的状态向量。

#### 4.2 观测量的选取

两个子组合系统分别独立观测,量测方程为

$$Z = HY + V$$

INS/GPS子系统的观测量取为惯导系统与GPS二者之间的伪距与伪距率之差。而INS/CNS子系统则是以补偿了安装误差后的星体跟踪器输出量作为观测值的。其中 $Z = (Z_g \ Z_c)^T$ 分别为两个子系统的观测量; $H = (H_g \ H_c)^T$ 为观测矩阵; $V = (V_g \ V_c)^T$ 为量测噪声向量。

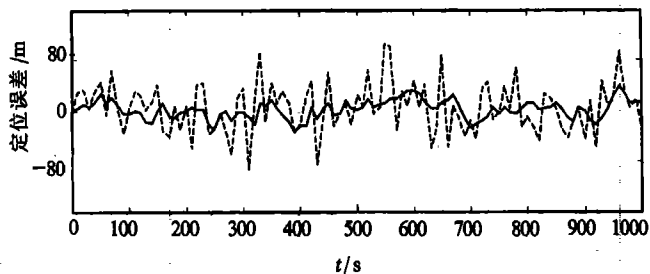


图3 常规滤波与联合滤波导航定位误差对比

Fig. 3 Position error contrast of general Kalman filter and federal Kalman filter

图3所示的是对上述系统的计算机仿真结果。图中的虚线为常规卡尔曼滤波情况下的定位误差,实线为采用联合卡尔曼滤波技术后的定位误差,可以看出,融合后的系统精度得到了明显改善。表明该方法对于提高整个系统的精度和可靠性是十分有效的。

## 5 结论

本文对联合卡尔曼滤波的原理及结构进行了探讨,给出了基于联合滤波的信息融合算法。联合滤波主要致力于解决的问题是:(1)提高滤波精度;(2)提高滤波器的容错性能;(3)优化融合算法,减小计算量和数据通讯,以利于算法的实时执行。但上述的几个方面的要求有时又是相互矛盾的,例如:容错性能要好,有时就要牺牲一些精度,为了解决这几个性能要求,联合滤波中用了“信息分配”的原则。可以在这几个性能要求中获得最佳的折衷,以满足不同的使用要求。总之,联合滤波算法是处理多传感器信息融合系统行之有效的方法。

### 参考文献:

- [1] 秦永元,张洪钺,汪叔华.卡尔曼滤波与组合导航原理[M].

西安:西北工业大学出版社,1998.

- [2] KERR T H. Decentralized filtering and redundancy management for multisensor navigation [J]. *IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems*, 1987, 23(1): 83-119.
- [3] SPEYER J L. Computation and transmission requirements for a decentralized linear-quadratic-Gaussian control problem[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1979, 24(2): 266-269.
- [4] CARLSON N A, BERARDUCCI M P. Federated Kalman filter simulation results. *Journal of the Institute of Navigation* 1994, 41(3): 297-321.
- [5] CARLSON N A. Federated Kalman filter for fault-tolerant integrated navigation systems[A]. *Proceeding of IEEE Plans* [C]. Orlando: FL, 1988. 110-119.
- [6] 张崇猛,陈超美,庄良杰等.信息融合理论及其在INS/GPS/Doppler组合导航系统中的应用[J]. *中国惯性技术学报*, 1999, 7(3): 1-8.
- [7] 马昕,于海田,袁信.组合导航系统中的联邦滤波算法研究[J]. *东南大学学报*, 1998, 28(5): 49-53.
- [8] 孙枫.组合导航系统[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,1996.

(编辑:王长风)

(上接第177页)

## 4 结束语

本文提出了一种基于 $H^\infty$ 鲁棒控制的直线电机同步传动控制器,使 $H^\infty$ 反馈控制器与位置控制器相结合,既保证了闭环系统的鲁棒稳定和跟随性能,又具有很高的同步精度,且结构简单,易于实现。经仿真验证所提方案是行之有效的。

### 参考文献:

- [1] LEE H S. Robust motion controller design for high-accuracy positioning systems[J]. *IEEE Trans on Industrial Elect*,

1996, 43(1): 48-55.

- [2] 郭庆鼎,王成元.直线交流伺服系统的精密控制[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
- [3] 申铁龙. $H_\infty$ 控制理论及应用[M]. 北京:清华大学出版社,1996.
- [4] 孙文焕.多电机协调控制的发展[J]. *电气传动*, 1999, 29(6): 3-6.
- [5] KOREN Y. Cross-coupled biaxial computer control for manufacturing system[J]. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1980, 102(12): 256-272.

(编辑:徐兴华)