

# 一种基于信息融合的滤波算法及其应用

黄晓瑞, 崔平远

(哈尔滨工业大学航天工程与力学系, 黑龙江哈尔滨 150001)

**摘 要:** 本文从组合导航系统研究的角度出发, 提出了一种应用卡尔曼滤波技术建立多传感器信息融合系统的方法, 该方法克服了以往存在的局部滤波器和全局滤波器具有相同数学模型的缺点, 增强了算法的通用性. 文中从概念理解、模型建立、系统结构等方面作了详细的分析, 并针对 GPS/INS 组合导航系统进行了仿真. 结果表明: 该算法对提高导航系统的精度和运算速度是行之有效的.

**关键词:** 信息融合; 卡尔曼滤波; 组合导航

**中图分类号:** TP274; TN967.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2001) 09-1225-03

## A New Filtering Algorithm Based on Information Fusion and Its Application

HUANG Xiao-rui, CUI Ping-yuan

(Dept. of Astronautics Engineering and Mechanics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract:** A new filtering Algorithm based on information fusion is presented in this paper in view of the research on integrated navigation system. This method overcomes the demerit of the same mathematical model in local and global filter, therefore improves the versatility of the system. The authors analyze the basic concept, model establishment and frame of the integrated navigation system in detail, then give the computer simulation for GPS/INS. The results show this method is very useful because it can improve the accuracy and calculation speed of the system.

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

### 1 引言

八十年代以来, 随着科学技术的迅速发展, 可供运载体装备的导航系统越来越多, 如: 惯性导航系统 (INS)、卫星导航系统 (GPS)、天文导航系统 (CNS)、地形参考系统 (TRN) 等. 但是, 任何一种导航方法都存在可用性问题, 每个系统的固有误差以及物理上的限制, 都将影响到该导航设备的广泛应用<sup>[1,2]</sup>. 例如: GPS 为非自主式导航系统, 受到美国 SA 政策的限制, 同时也可能受到地形地物的遮挡, 使可见卫星数减少而导致无法定位; 而惯性导航系统虽然可完全自主地进行导航, 但其定位误差随时间不断积累, 载体长时间工作时, 导航精度将逐渐降低. 这些缺陷都使导航系统的应用范围受到限制. 如果将这些具有互补性和非相似性的导航子系统组合起来, 就可以相互取长补短, 充分利用各子系统的信息, 提高导航精度、扩大使用范围. 同时对于各子系统测量的相同信息源, 也可使测量值冗余, 从而提高整个导航系统的可靠性.

本文针对组合导航这一特定问题, 讨论了多传感器信息融合的概念和方法, 并着重介绍了基于卡尔曼滤波的信息融合的算法, 最后对 INS 和 GPS 这两个目前最常用导航系统的组合原理、构成和数学模型进行了分析和仿真.

### 2 信息融合技术概述

#### 2.1 信息融合基础

信息融合是针对一个系统使用多种传感器这一特定问题而展开的一种关于信息处理的研究<sup>[3]</sup>. 它利用多个传感器获得的多种信息, 得出对环境或对象特征的全面、正确的认识. 在大多数情况下, 单一传感器很难对环境有一个准确的描述, 而多个单一传感器的简单组合也很难使系统正确了解环境状况, 因此必须寻找一种技术手段, 对这些传感器的信息进行筛选和分析, 从而得到可靠的决策, 多传感器信息融合就正是这样一种手段, 它结合了自动控制、人工智能和决策论的发展, 克服了单一传感器给系统带来的误报风险大、可靠性和容错性低的缺陷, 为人类探索未知的环境提供了一种技术解决途径<sup>[4,5]</sup>. 但并不是所有的有多个信息源或者多个传感器的系统都可以称得上是信息融合系统, 关键是看系统中如何处理这些信息, 信息之间可以是相互补充、相互确认、甚至是相互矛盾的. 也就是说, 信息对象之间有一种关系. 基于这种想法, 我们可以将信息融合技术与某一种系统结构的设计绑定起来, 从而建立一种系统化的概念. 信息融合技术的采用能够扩展整个系统在时间、空间上的覆盖率, 增加系统的信息利用率.

并提高整个系统的可靠性和精度。

具体地说,多传感器信息融合技术是指通过一定的算法“合并”来自多个信息源的信息,以产生更可靠、更准确的信息,并根据这些信息做出最可靠的决策。即根据观测信息给出一个关于状态的最优估计量。其关键技术是对各类原始信息进行校准、相关、估计及误差模式识别和状态决策等处理。多传感器系统是信息融合技术的硬件基础,多源信息是信息融合的加工对象,具有最优估计的融合算法是信息融合的核心。

## 2.2 多传感器信息融合常用方法

信息融合技术是近几年刚刚起步的一门实践应用技术,目前还没有普遍适用的概念和统一的表达方式。各领域的信息融合方案各有不同。在多传感器信息融合技术诞生的初期,主要有两种技术手段,贝叶斯估计和 Dempster-Shafer 证据理论。随着信息融合技术在很多领域的不断推广,神经网络、模糊集理论、专家系统等方法也在这方面得到了迅速的发展。另外,小波理论在多传感器信息融合领域的应用也正在开展,多用于图像分析。

## 2.3 基于 Kalman 滤波的多传感器信息融合算法及流程图

卡尔曼滤波在控制领域得到广泛应用以后,也逐渐成为多传感器信息融合系统的主要技术手段,并取得了很好的效果,如 Smith<sup>[6]</sup>等人应用卡尔曼滤波来估计合并坐标框架下的多维不确定性;Alonzo Kelly<sup>[7]</sup>采用三维状态空间的卡尔曼滤波来进行移动机器人导航。1988 年 Carlson<sup>[2,8]</sup>提出了联邦滤波理论,旨在为容错组合导航系统提供设计理论,其基本思想是在诸多非相似导航子系统中选择导航信息全面、输出速率高、可靠性绝对保证的子系统作为公共参考系统,与其它子系统两两结合,形成若干子滤波器。各子滤波器并行运行,获得建立在子滤波器局部量测基础上的局部最优估计,这些局部最优估计在主滤波器内按融合算法合成,获得建立在所有量测基础上的全局估计。

然而目前大多数文献中应用卡尔曼滤波器进行信息融合都是针对局部滤波器和全局滤波器都采用相同的模型<sup>[9,10]</sup>,对于组合导航这一类问题,由于所采用的子系统可能会因为应用环境的差异而各不相同,因此本文认为:局部和全局滤波器的模型采用不同形式,将会使算法更加精确,更为可贵的是

通用性增强。

基于这种考虑,我们将融合系统的数学模型和融合算法描述如下<sup>[10,11]</sup>,图 1 为相应的流程图。

全局模型:

$$\begin{cases} X(k+1) = \Phi(k+1, k)X(k) + G(k+1)w(k+1) \\ Z_i(k+1) = C_i(k+1)X(k) + v_i(k+1), \quad i=1, \dots, n \end{cases}$$

局部模型:

$$\begin{cases} X_i(k+1) = \Phi_i(k+1, k)X_i(k) + G_i(k+1)w_i(k+1) \\ Z_i(k+1) = H_i(k+1)X_i(k) + v_i(k+1), \quad i=1, \dots, n \end{cases}$$

且有:  $C_i(k+1) = H_i(k+1)S_i(k+1), \quad i=1, \dots, n$

局部滤波器算法:

$$\hat{X}_i(k+1/k+1) = A_i(k+1)\hat{X}_i(k/k) + M_i(k+1)Z_i(k+1)$$

$$A_i(k+1) = [I - M_i(k+1)H_i(k+1)]\Phi_i(k+1, k)$$

$$M_i(k+1) = P_i(k+1/k)H_i^T(k+1) \cdot [H_i(k+1)P_i(k+1/k) + H_i^T(k+1) + R_i(k+1)]^{-1}$$

$$P_i(k+1/k) = \Phi_i(k+1, k)P_i(k/k)\Phi_i^T(k+1, k) + G_i(k+1) \cdot Q_i(k+1)G_i^T(k+1)$$

$$P_i(k+1/k+1) = [I - M_i(k+1)H_i(k+1)]P_i(k+1/k)$$

全局滤波器(信息融合中心)算法:

$$\hat{X}(k+1/k+1) = \Omega(k+1/k+1) + \sum_{i=1}^n F_i(k+1)\hat{X}_i(k+1/k+1)$$

$$\Omega(k+1/k+1) = A(k+1)\Omega(k/k) + \sum_{i=1}^n T_i(k+1)\hat{X}_i(k/k)$$

$$F_i(k+1) = P(k+1/k+1)S_i^T(k+1)P_i^{-1}(k+1/k+1)$$

$$T_i(k+1) = A(k+1)F_i(k) - F_i(k+1)A_i(k+1)$$

$$A(k+1) = [I - \sum_{i=1}^n M_i(k+1)C_i(k+1)]\Phi(k+1, k)$$

$$M_i(k+1) = P(k+1/k)C_i^T(k+1) \cdot [C_i(k+1)P(k+1/k) + C_i^T(k+1) + R_i(k+1)]^{-1}$$

$$P(k+1/k) = \Phi(k+1, k)P(k/k)\Phi^T(k+1, k) + G(k+1) \cdot Q(k+1)G^T(k+1)$$

$$P(k+1/k+1) = [I - \sum_{i=1}^n M_i(k+1)C_i(k+1)]P(k+1/k)$$

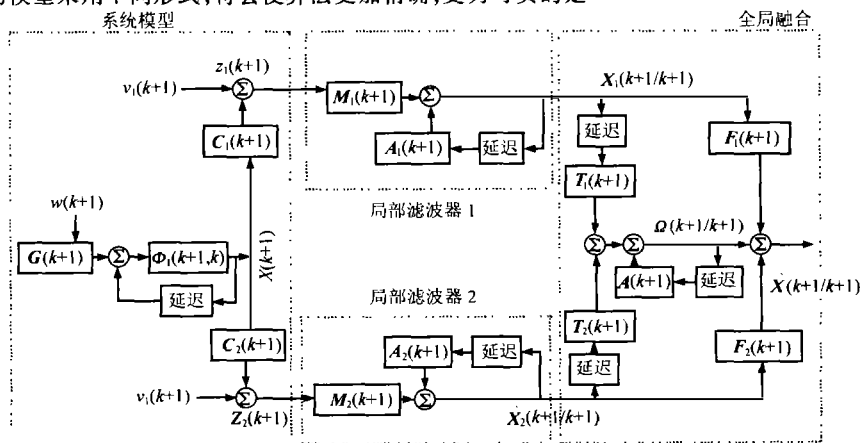


图 1 具有两个局部滤波器的信息融合算法流程示意图

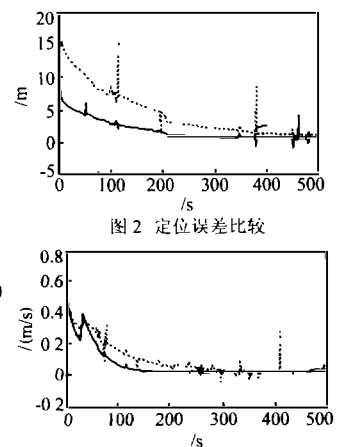


图 3 速度误差比较

### 3 GPS/INS 组合导航系统的描述

#### 3.1 组合原理

GPS/INS 组合可用多种方式,常用的有两种:松耦合(即位置、速度组合)和紧耦合(即伪距、伪距率组合)<sup>[3]</sup>;这里采用第二种,即利用 GPS 接收机、惯性陀螺和加速度计的测量作为多源信息,组合导航系统将这些信息,按照最小均方差准则进行融合,给出关于状态的最优估计,然后对惯性导航系统的导航信息及惯性器件的误差进行校正。

#### 3.2 GPS/INS 组合导航系统状态方程

GPS/INS 组合系统的状态方程可用一阶矩阵微分方程来描述:

$$\dot{X}(t) = F(t)X(t) + G(t)W(t) \quad (1)$$

$$Z(t) = H(t)X(t) + V(t) \quad (2)$$

其中,  $X$  取为 17 维状态向量,包括惯导系统误差  $X_{\text{INS}}$  15 维和  $X_{\text{GPS}}$  2 维:

$$X = [X_{\text{INS}} \quad X_{\text{GPS}}]^T = [\delta r \quad \delta V \quad \Psi \quad \varepsilon \quad \nabla \quad \Delta t_r \quad \delta t_r]^T$$

其中,  $\delta r$  为三维位置误差,  $\delta V$  为三维速度误差,  $\Psi$  为三维平台姿态角误差;  $\varepsilon$  为三维陀螺漂移分量;  $\nabla$  为三维加速度计零偏分量,  $\Delta t_r$ ,  $\delta t_r$  分别为 GPS 接收机的钟差和时钟漂移,  $F(t)$

为动态矩阵,  $W(t)$  为系统噪声:  $F = \begin{bmatrix} F_{\text{INS}} & 0 \\ 0 & F_{\text{GPS}} \end{bmatrix}$ ;  $W = [W_{\text{INS}}$

$W_{\text{GPS}}]^T$ ,  $Z = [\delta \rho \quad \delta \dot{\rho}]^T$  为 GPS 与 INS 两个子系统的伪距和伪距变化率之差的观测矢量;  $H = [H_1 \quad H_2]^T$  为观测矩阵,  $V = [V_1 \quad V_2]^T$  为伪距、伪距变化率的观测噪声;

将式(1)和式(2)离散化:

$$X(k) = \Phi(k, k-1)X(k-1) + \Gamma(k-1)W(k-1) \quad (3)$$

$$Z(k) = H(k)X(k) + V(k) \quad (4)$$

式中  $\Phi(k, k-1)$  为  $t_{k-1}$  时刻至  $t_k$  时刻的一步状态转移阵:

$$\Phi(k, k-1) = e^{F\Delta t} = I + F\Delta t + F^2 \frac{\Delta t^2}{2!} + F^3 \frac{\Delta t^3}{3!} + \dots$$

对于式(3)、(4)所描述的状态空间,可根据观测量,用 2.3 节给出的基于卡尔曼滤波的融合算法得出全局估计  $\hat{X}(k) = E[X(k)/Z_1(j), \dots, Z_k(j), j=1, \dots, k]$ 。

### 4 系统仿真

根据对上述算法和系统的描述,我们对 GPS/INS 组合导航系统进行了数学仿真,结果如图 2 和图 3 所示。图中虚线为 GPS 单独导航时的位置和速度误差曲线,实线为 GPS/INS 组合导航时的位置和速度误差曲线,可以看出,在初始条件相同的情况下,组合后定位精度和收敛速度得到明显提高。

### 5 结论

本文探讨了卡尔曼滤波在基于多传感器信息融合的组合

导航系统中的应用,对局部和全局滤波器结构不相同时的滤波算法进行了研究,通过对 GPS/INS 组合导航系统仿真表明,该方法对于提高整个系统的精度和可靠性是十分有效的,同时也提高了计算的速度。

#### 参考文献:

- [1] 董绪荣,张守信,华仲春. GPS/INS 组合导航定位及其应用[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1998.
- [2] 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.
- [3] 邵文贤,雍少为,郭桂荣. 多传感器信息融合技术述评[J]. 国防科技大学学报,1994,16(4):1-11.
- [4] 金峰. 机器人多传感器信息融合系统理论的研究[D]. 博士学位论文. 哈尔滨:哈尔滨工业大学研究生院,1999.
- [5] Luo Ren C, et al. Multisensor Integration and Fusion for Intelligent Machines and Systems[M]. Ablex Publishing Corporation, Norwood, New Jersey, USA, 1995.
- [6] Smith R C, et al. On the Representation an estimation of spatial uncertainty[J]. Int. J. Robot. 1986, 5(4):56-68.
- [7] Alonzo Kelly. A 3D Space Formulation of a Navigation Kalman Filter for Autonomous Vehicles[R]. Technical Report. CMU-RI-TR-94-19, CS of CMU, 1994.
- [8] N A Carlson. Federated Kalman filter simulation results[J]. Navigation. 1994, 41(3):297-321.
- [9] Speyer J L. Computation and transmission requirements for a decentralized linear-quadratic-Gaussian control problem[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1979, AC-24(2):266-269.
- [10] B D Brumback, et al. A Fault-tolerant multisensor navigation system design[J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 1987, AES-23(6):738-755.
- [11] 申功勋,孙建峰. 信息融合理论在惯性/天文/GPS 组合导航系统中的应用[M]. 北京:国防工业出版社,1998.

#### 作者简介:



黄晓瑞 女. 1971 年 5 月出生于黑龙江哈尔滨, 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: GPS 全球定位系统、组合导航、信息融合等。

崔平远 男. 1961 年 11 月出生于山东青岛, 哈尔滨工业大学航天工程与力学系教授、博士生导师, 中国航空学会专业委员会委员,《数据采集与处理》杂志编委. 主要研究方向为: 非线性控制、神经网络、信息融合、智能控制等。