

北斗双星定位系统上的基于联邦 Kalman 滤波的组合导航技术

杨 阳¹ 张素琴¹ 戴桂兰²

(清华大学计算机科学与技术系 清华天通广应用通信系统研究所 北京 100084)¹

(清华大学信息技术研究院 北京 100084)²

摘要 作为常用导航手段的惯性导航、GPS 系统等单一的导航设备,已不能满足现代电子战条件下的作战使用需求。因此,目前世界各国广泛采用多设备组合、冗余设计、多功能的组合导航系统。本文设计了基于联邦 Kalman 滤波的组合导航技术,进行了相应的数据仿真实验,并使用北斗星定位系统上的实际运行数据进行了算法验证,从而验证了在北斗双星定位系统上使用基于联邦 Kalman 滤波组合导航技术的有效性和可行性,为未来进一步在中国独立自主研究的北斗双星定位系统上进行实际的工程应用和商业应用奠定了良好的基础。

关键词 联邦 Kalman 滤波,组合导航,信息融合

Integrated Navigation Technology Using Federated Kalman Filter Based on BD Position System

YANG Yang¹ ZHANG Su-Qin¹ DAI Gui-Lan²

(Computer Science and Technology Department, Tsinghua University, Beijing 100084)¹

(Research Institute of Information Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)²

Abstract The familiar navigation technology such as inertial navigation, GPS navigation has on longer satisfied all requirements on modern electronic warfare. The integrated navigation technology which is multi equipment, redundancy designed, multi functional are widely applied on many country. This paper designed integrated navigation technology using Federated Kalman filter based on BD position system, executed some simulation experiment and some practical experiment, validated the feasibility of integrated navigation technology using Federated Kalman filter based on BD position system, established foundation stone of the widely application of integrated navigation technology using Federated Kalman filter based on BD position system.

Keywords Federated kalman filter, Integrated navigation, Information fusion

为了正确可靠地对运动载体或目标进行精确导航,导航系统必须为整个系统提供足够精确和可靠的位置、速度和姿态等信息。导航系统既要能提供高精度的航向、姿态、角速度、线速度和及时位置等导航参数,又应具有很强的容错能力和余度导航能力。在过去的几十年里,导航系统从单一传感器类型系统发展到组合导航系统,将多种类型的传感器进行优化配置,性能互补,从而使得系统的精度和可靠性都有了很大的提高。

组合导航的方式很多,如惯性/航标、GPS/惯性、GPS/视觉、GPS/激光雷达等。所谓组合导航就是采用两种或两种以上的导航设备组合起来的导航系统,它具有以下几种功能:

协合功能。利用各种导航分系统的信息,形成分系统所不具备的导航功能。

互补功能。组合后的导航系统功能虽然与各分系统的导航功能相同,但它们能够综合利用各分系统的特点,优势互补,从而扩大了使用范围,提高了导航精度。

余度功能。采用两种以上导航系统组合而成的组合导航系统具有余度导航的能力,增加了导航系统的可靠性。

目前常见的组合导航技术的优缺点如下:

组别导航技术	优点	缺点
惯性/航标	技术成熟	使用范围限制
GPS/惯性	目前广泛使用,主流技术	作用有限,缺乏进一步发展空间
GPS/视觉	获取信息量大,前沿技术	运算量巨大,微型化困难,未实用化
GPS/激光雷达	精度高,前沿技术	获取信息量有限,技术限制,成本问题

在组合导航系统中,其实用化的必然步骤就是进行数据融合。多传感器数据融合技术就是指通过一定的算法合并来自多个信息源的信息,以产生比单个传感器所得到的数据更可靠、更准确的数据,并根据这些数据作出最可靠的决策。根据实际应用领域,信息融合分为同类多源数据融合和不同类多源数据融合。在 GPS/惯性组合导航系统中,目前主要的融合方法有综合平均法、Bayesian 估计法、D-S 法 (Dempster Shafter)、模糊逻辑法、神经网络方法、联邦 Kalman 滤波方法等。

联邦 Kalman 是多传感器信息融合系统的主要技术手段之一。其系统设计基本思想是先分散处理,再全局融合,即在诸多非相似子系统中选择一个信息全面、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测量基础上的局部最优估计,这些局部最优估计是在主滤波器内按融合算法合成,从而获得建立在所有测量基础上的全局估计。联邦 Kalman 滤波方法是信息融合中进行位置估计的有效方法。

而传统的组合导航系统最为核心的系统必须依赖于美国的全球定位系统(Global Positioning System,通常简称 GPS),虽然 GPS 系统已经在全球范围上有相当广泛的军事用途和商业用途,但是由于 GPS 系统的管理权仍旧在美国政府手中,在一些特殊的环境和情况下,例如战争期间,基于 GPS 的系统将无法得到有效的可用性保证,则基于其上的各种应用包括军事用途和商业用途都将陷于瘫痪。于是乎,能够在中国独立自主研究开发的北斗双星定位系统上建立起完善的各种应用服务,包括精确导航定位等,能够为依赖于精确导航定位的军用和民用的各种导航设备提供有力而可靠的支撑平台。

清华大学与清华天通广应用通信系统研究所合作开发针对“北斗二代”的客户接收机的应用,使用北斗双星定位系统替代 GPS 系统作为全球定位数据源,进行组合导航的技术研究,设计了基于联邦 Kalman 滤波的组合导航技术,进行了相应的数据仿真实验,并使用北斗双星定位系统上的实际运行数据进行了算法验证,从而验证了在北斗双星定位系统上使用基于联邦 Kalman 滤波组合导航技术的有效性和可行性。

1 基于 Kalman 滤波理论的数据滤波

Kalman 滤波是由 R. E. Kalman 提出的,它是一种线性最小方差估计,算法具有递推性,使用状态空间方法在时域内设计滤波器,适于对多维随机过程进行估计,便于在计算机上实现。在组合导航系统上的设计是基应用较为成功的一个方面。在 Kalman 滤波的应用环境下,假定系统为随机线性离散系统,则系统的方程为

$$\begin{cases} X_k = \Phi_{k,k-1} X_{k-1} + \Gamma_{k,k-1} W_{k-1} \\ Z_k = H_k X_k + V_k \end{cases}$$

式中 X_k 是系统的 n 维状态向量, Z_k 是系统的 m 维观测序列, W_k 是 p 维系统过程噪声序列, V_k 是 m 维观测噪声序列, $\Phi_{k,k-1}$ 是系统的 $n \times n$ 维状态转移矩阵, $\Gamma_{k,k-1}$ 是 $n \times p$ 维噪声输入矩阵, H_k 是 $m \times n$ 维观测矩阵。

关于系统过程噪声和观测噪声的统计特性,我们假定:

$$\begin{cases} E[W_k] = 0 \\ E[W_k W_j^T] = Q_k \delta_{kj} \\ E[V_k] = 0 \\ E[V_k V_j^T] = R_k \delta_{kj} \\ E[W_k V_j^T] = 0 \end{cases}$$

其中 Q_k 是系统过程噪声 W_k 的 $p \times p$ 维对称非负定方差矩阵, R_k 是系统观测噪声 V_k 的 $m \times m$ 维对称正定方差阵, δ_{kj} 是 Kronec ker- δ 函数。

如果被估计状态 X_k 和对 X_k 的观测量 Z_k 、系统过程噪声 W_k 和观测噪声 V_k 满足上述的假设,系统过程噪声方差阵 Q_k 非负定,系统观测噪声方差阵 R_k 正定, k 时刻的观测为 Z_k ,则 X_k 的估计 \hat{X}_k 可按下述方程求解:

状态一步预测

$$\hat{X}_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} \hat{X}_{k-1}$$

状态估计

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k,k-1} + K_k [Z_k - H_k \hat{X}_{k,k-1}]$$

滤波增益矩阵

$$K_k = P_{k,k-1} H_k^T [H_k P_{k,k-1} H_k^T + R_k]^{-1}$$

一步预测误差方差阵

$$P_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} P_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + \Gamma_{k,k-1} Q_{k-1} \Gamma_{k,k-1}^T$$

估计误差方差阵

$$P_k = [I - K_k H_k] P_{k,k-1} [I - K_k H_k]^T + K_k R_k K_k^T$$

其中,可以进一步写成

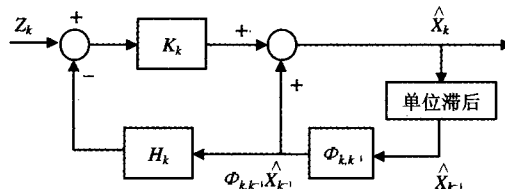
$$K_k = P_k H_k^T R_k^{-1}$$

$$P_k = [I - K_k H_k] P_{k,k-1}$$

只要给定初值 \hat{X}_0 和 P_0 ,根据 k 时刻和观测值 Z_k ,就可以递推算得 k 时刻的状态估计 \hat{X}_k 。

在一个滤波周期内,从 Kalman 滤波在使用系统信息和观测信息的先后次序来看,Kalman 滤波具有两个明显的信息更新过程:时间更新过程和观测更新过程。状态一步预测说明了根据 $k-1$ 时刻的状态估计预测 k 时刻的方法,一步预测误差方差阵对这种预测的质量优劣做了定量描述。在计算中仅使用了与系统的动态特性有关的信息,如状态一步转移矩阵、噪声输入阵、过程噪声方差阵。从时间的推移过程来看,是将时间从 $k-1$ 时刻推进至 k 时刻,描述了 Kalman 滤波的时间更新过程。其余一些计算量用来计算对时间更新值的修正量,该修正量由时间更新的质量优劣 $P_{k,k-1}$ 、观测信息的质量优劣 P_k 、观测与状态的关系 H_k ,以及具体的观测信息 Z_k 所确定,所有这些方程围绕一个目的,即正确、合理地利用观测 Z_k ,所以这一过程描述了 Kalman 滤波的观测更新过程。

Kalman 滤波器结构如下:



2 仿真实验

按照 Kalman 滤波理论,我们进行了相应的仿真试验,分别用于验证 Kalman 滤波在数据滤波方面的有效性和收敛性。通过实验 1,我们可以验证 Kalman 滤波的有效性;通过实验 2,我们可以验证 Kalman 滤波的收敛性。

2.1 实验 1

在实验 1 中,使用随机生成的系统实际值,然后对系统实际值添加噪声,作为系统的测量值,然后将测量值输入给 Kalman 滤波器,通过 Kalman 滤波器的滤波生成滤波结果。

通过实验,能够发现实际值在加上了较大的噪声之后形成的测量值,在明显的偏离实际值的情况下,经过 Kalman 滤波之后的滤波结果能够较准确地跟随实际值,能够起到较好的滤波效果,从而验证了 Kalman 滤波在数据滤波中的有效性,如图 1。

2.2 实验 2

在实验 2 中,使用固定的系统实际值,然后系统实际值添加噪声,作为系统的测量值,然后将测量值输入给 Kalman 滤波器,通过 Kalman 滤波器的滤波生成滤波结果。

通过实验可以看出,尽管包含噪声的测量值有较大的波动和偏移,但是对测量值进行 Kalman 滤波之后,滤波结果则能够很快的收敛并稳定在实际值附近。算法收敛的速度和效果均比较理想,如图 2。

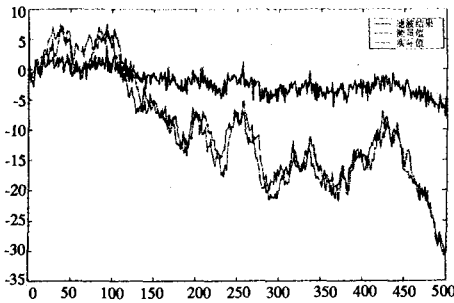


图1 实验1的实验结果

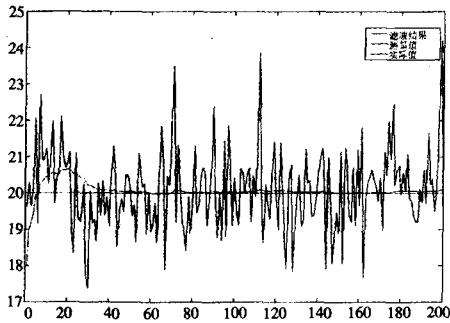


图2 实验2的实验结果

3 基于联邦 Kalman 滤波理论的数据融合

利用 Kalman 滤波技术对多传感器进行数据融合有两种途径,集中式 Kalman 滤波和分散化滤波。集中式 Kalman 滤波是利用一个滤波器来集中处理所有子系统的信息,集中式 Kalman 滤波存在计算量巨大的问题,在实际使用中很难解决实时性问题,同时对多个子系统的容错能力也很差,难以应对部分子系统失效的情况。与之相对,分散式 Kalman 滤波则是解决大系统的状态估计,降低计算量的有效途径,能够在实际使用中发挥实用性的效果。

在分散化滤波方法中,联邦 Kalman 滤波是具有设计灵活,计算量小,容错性能好的特点,是目前使用较为广泛的数据融合技术。

首先考虑有两个子滤波器的情况。设局部状态估计为 \hat{X}_1, \hat{X}_2 , 相应的估计误差方差为 P_{11}, P_{22} , 则完成数据融合后的全局状态估计 \hat{X}_g 为局部状态估计的线性组合,即

$$\hat{X}_g = W_1 \hat{X}_1 + W_2 \hat{X}_2$$

其中, W_1, W_2 是待定的加权阵。

在假定局部状态估计不相关的情况下,则全局状态估计 \hat{X}_g 应满足以下公式:

$$\begin{cases} E[X - \hat{X}_g] = 0 \\ P_g = E\{[X - \hat{X}_g][X - \hat{X}_g]^T\} = \min \end{cases}$$

其中 X 为真实状态, P_g 为 \hat{X}_g 估计误差方差为最小。

同时由于 \hat{X}_1, \hat{X}_2 为 X 的最优无偏估计,则

$$W_1 + W_2 = I$$

可以解算出

$$\begin{cases} P_g = P_{11} - [P_{11} - P_{12}][P_{11} - P_{12} - P_{21} + P_{22}]^{-1}[P_{11} - P_{12}]^T \\ \hat{X}_g = \hat{X}_1 + [P_{11} - P_{12}][P_{11} - P_{12} - P_{21} + P_{22}]^{-1}[\hat{X}_2 - \hat{X}_1] \end{cases}$$

其中

$$P_{12} = P_{21} = E\{[X - \hat{X}_1][X - \hat{X}_2]^T\}$$

在假定局部状态估计不相关的情况下,则可以简化为

$$\begin{cases} P_g = [P_{11}^{-1} + P_{22}^{-1}]^{-1} \\ \hat{X}_g = [P_{11}^{-1} + P_{22}^{-1}]^{-1}[P_{11}^{-1}\hat{X}_1 + P_{22}^{-1}\hat{X}_2] \end{cases}$$

利用数学归纳法,可以将结果推广到多个局部状态估计的情况。

若有 N 个局部状态估计 $\hat{X}_1, \hat{X}_2, \dots, \hat{X}_N$ 和相应的估计误差方差阵 $P_{11}, P_{22}, \dots, P_{NN}$, 且各局部状态估计互不相关,则全局最优估计为

$$\begin{cases} \hat{X}_g = P_g \sum_{i=1}^N P_{ii}^{-1} \hat{X}_i \\ P_g = (\sum_{i=1}^N P_{ii}^{-1})^{-1} \end{cases}$$

这个结果的物理意义很明显:若 \hat{X}_i 的估计精度较差,则相应的 P_{ii} 就会较大,其在全局估计中的权重就会小。

3.1 实验3

在实验3中,被观测的系统设定有一个系统实际值,将这个随机生成的实际值作为原始数据,然后分别由两个观测装置进行测量,即独立的分别对该实际值进行添加噪声形成两个观测结果。然后使用联邦 Kalman 滤波对两个观测结果进行数据融合,形成最终的滤波结果。

通过实验,可以看出在使用 Kalman 滤波的子滤波器的情况下,子滤波器的结果比较接近实际值,在进一步使用联邦 Kalman 滤波进行数据融合,能够进一步提升结果的精度,能够进一步逼近实际值,如图3。

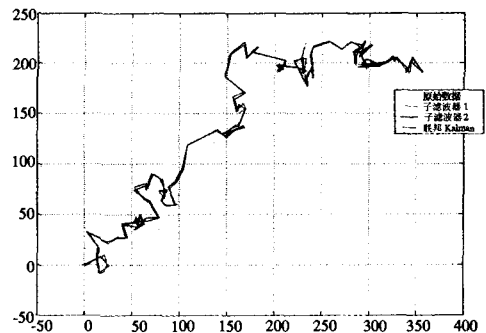


图3 北斗双星定位系统上联邦 Kalman 滤波实际运行结果

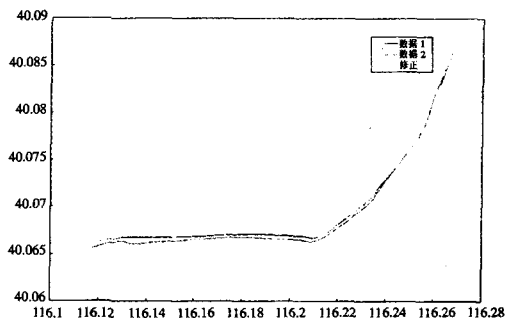


图4 实验4的实验结果

3.2 实验4

在实验4中,被观测系统是实际运行的一个运动平台,在该平台的一次运行过程中,使用北斗双星定位系统作为定位源,分别使用有源和无源方式接收机进行定位测量,分别获取同一运动平台同一次运动轨迹的两种测量结果,将这两组观测数据,作为输入,然后使用联邦 Kalman 滤波系统进行数据融合,获得最终的滤波结果,即对运行平台的运动轨迹的估计结果。

通过实验,能够获知在实际运行环境中的,使用联邦

Kalman 滤波系统的结果是比较稳定和平滑的,能够起到较好的数据融合效果,具有实用性和应用前景,如图 4。

结束语 本文通过不同的仿真实验结果和实际运行实验结果,验证了在使用北斗双星定位系统的基础上,使用联邦 Kalman 滤波进行组合导航的有效性,能够在不同的环境中提升组合导航的精度和稳定性,同时联邦 Kalman 滤波具有计算量小、性能稳定、收敛快的优点,有利于产品的实用化。

参考文献

- 1 杜尚丰,宫晓琳. GPS/SINS 综合定位系统仿真实验研究. 仪器仪表学报,2005(S1)
- 2 刘钧圣,朱文彪. 一种模糊自适应 INS/GPS 组合导航方法. 现代防御技术,2005(5)
- 3 杨坤明. 组合导航系统的卡尔曼滤波器的设计. 西华大学学报(自

- 然科学版),2005(4)
- 4 华冰,刘建业,熊智. 联邦自适应滤波在 SINS/北斗/星敏感器组合导航系统中的应用. 东南大学学报(自然科学版),2004(S1)
- 5 Sasiadek J Z, Khe J. Sensor fusion based on fuzzy Kalman filter [J]. In: IEEE, The Second Workshop on Robot Motion and Control, October 2001. 18~20
- 6 Sasiadek J Z, Wang Q. Sensor Fusion Based on Fuzzy Kalman Filtering for Autonomous Robot Vehicle[C]. In: Proceedings of the 1999 IEEE Int Conf on Robotics and Automation
- 7 Sasiadek J Z, Wang Q, Zeremba M B. Fuzzy Adaptive Kalman Filtering for INS/GPS Data Fusion[C]. In: Proceedings of the 15th IEEE International Symposium on Intelligent Control, 2000
- 8 Lawrence P J Jr, Berarducci M P. Navigation sensor, filter, and failure mode simulation results using the distributed Kalman filter simulator (DKFSIM). In: Position Location and Navigation Symposium, April 1996. 697~710

(上接第 109 页)

仿真提供基础。同时,采用了基于 Filter Index 的快速事件匹配路由结构作为事件在路由器上进行寻址及转发的路由策略。实验环境为 CPU P4 1.5G、RAM 256M、System Win2K,在实验中一共插入 45000 条订购,每隔 5000 条订购进行取样,记录插入订购和匹配发送事件所需的时间。

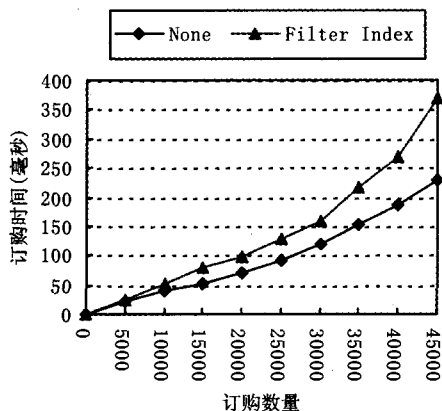


图 4 事件订购时间

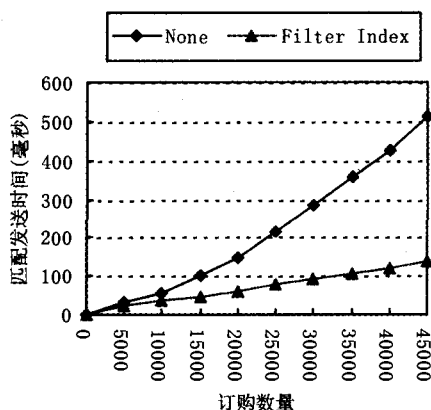


图 5 事件匹配发送时间

图 4 和图 5 分别是在原型系统上进行实验得到的订购时间和事件匹配发送时间的曲线。从图 4 中我们可以看出,在两组实验数据中,订购时间基本上都随着订购数量呈线性增长趋势,但是在订购数量增长到一定幅度后,采用 Filter Index 结构的订购时间大幅增长。分析原因,由于订购数量不断增大,导致 Filter Index 结构变得较为复杂,即在结构中插

入或删除节点的时间变长。在这方面,应该仍有改进的余地,如可根据事件订购的形式采用多组 Filter Index 结构以及 Cache 技术等。在图 5 中,事件匹配时间也基本上随着订购数量增长呈增长趋势,但比较两组实验数据可以明显看出采用 Filter Index 结构之后,事件的平均匹配传递时间得到了明显的改善,而且随着订购数量的不断增多,其效率的提高越显著。分析表明,实验结果达到了预期的效果,验证了本文提出大规模分布式虚拟环境中基于事件模型的路由机制是可行且有效的。

结束语 本文从事件路由和事件传递两个方面研究了分布式虚拟环境中基于事件模型的路由机制,提出了一种基于 Filter Index 结构的一种快速的事件匹配路由结构,并通过对依据本文设计方案实现的原型系统的实验和测试,验证了设计的可行性及正确性。今后的工作将从发掘事件之间的相关性,实现事件模板以及研究更丰富的订购语言等方面进行进一步的研究。

参考文献

- 1 潘志庚,姜晓红,张明敏,等. 分布式虚拟环境综述. 软件学报, 2000, 11(4): 461~467
- 2 Morse K L. An Adaptive Distributed Algorithm for Interest Management; [PhD Thesis]. University of California, 2000
- 3 Purbrick J, Greenhalgh C. Extending Locales: Awareness Management in MASSIVE-3. In: Proceedings of IEEE Virtual Reality, Feb. 2000
- 4 Abrams H A. Extensible Interest Management for Scalable Persistent Distributed Virtual Environments; [PhD thesis]. Naval Postgraduate School, 1999
- 5 Benford S, Greenhalgh C, Rodden T, et al. Collaborative Virtual Environments - to what extent is cyberspace a really space. Communications of the ACM, 2001, 44(7)
- 6 Starovic G, Tangney V C B. An Event Based Object Model for Distributed Programming. In: Proceedings of the International Conference on Object Oriented Information Systems, London, 1995
- 7 Yu H, Estrin D, Govindan R. A hierarchical proxy architecture for internet-scale event services. In: Proc. of WETICE99, Stanford, June 1999
- 8 Zabele S, Dorsch M, Ge Z, et al. SANDS: Specialized active networking for distributed simulation. In: DARPA Active Networks Conference and Exposition (DANCE), USA, May 2002
- 9 卢威,陈继明,徐晓阳,等. 分布式虚拟环境 AIMINET 的关键技术概述. 计算机科学,2006, 33(11)
- 10 Carzaniga A, Deng J, Wolf A L. Fast Forwarding for Content-Based Networking; [Technical report]. Dept. of Computer Science, Univ of Colorado, Nov. 2001
- 11 Purbrick J, Greenhalgh C. Extending Locales: Awareness Management in MASSIVE-3. In: Proceedings of IEEE Virtual Reality, Feb. 2000