

# 基于置信度加权的 INS/BD/GPS 组合导航信息融合

刘卓凡, 杨 凯

(空军工程大学航空航天工程学院, 陕西西安, 710038)

**摘要** 针对联邦卡尔曼滤波算法存在的不足, 将标准卡尔曼滤波方法和置信度加权方法相结合, 应用于组合导航系统。该方法利用了自适应神经网络模糊推理技术非线性、快速实时、自适应学习的优点, 将滤波器的输出数据进行置信度判别, 得到各个子系统加权值, 最后进行加权融合得到全局输出。仿真结果表明: 基于 ANFIS 神经网络置信度加权的组合导航信息融合技术在一定程度上抑制了数据的发散, 提高了导航精度。

**关键词** 组合导航; 置信度; 加权; ANFIS; 信息融合; INS/BD/GPS

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.01.011

中图分类号 TN967.2; TP183 文献标志码 A 文章编号 1009-3516(2013)01-0048-05

## Information Fusion of INS/BD/GPS Integrated Navigation System Based on Confidence Weighted

LIU Zhuo-fan, YANG Kai

(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** In order to resolve the shortcoming of the federated Kalman filter, the combination of the standard Kalman filter method and the confidence weighted method is applied in the integrated navigation system. In the method the advantages of Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System: non-linear; fast and real-time; adaptive learning are used to compute the confidence of filters' output data, then get the weighting factor of subsystems, and then fuse with these weighting factors to compute the comprehensive outputs. The simulation result shows that the new algorithm prevents the divergence of data effectively and the precision of navigation is improved.

**Key words:** integrated navigation system; confidence; weighted; ANFIS; information fusion; INS/BD/GPS

目前所应用的各种机载导航设备中, 经典导航设备定位所需时间长, 依赖已知坐标点, 不能在生疏地区应用<sup>[1]</sup>; 惯导系统需要利用已知点进行初始校准, 且定位误差随时间积累, 造价昂贵<sup>[2]</sup>; GPS 定位方便快捷, 精度高, 但是又有受制于人的致命缺陷<sup>[3-4]</sup>; 有些定位系统存在定位申请时间长, 发射信

号暴露目标, 定位数据滞后, 无高程数据的问题<sup>[5]</sup>。因此, 实现可靠、高精度的导航定位, 需要把几种不同的单一系统组合在一起, 利用多种信息源, 互相补充, 构成一种有多余度和导航准确度更高的多功能系统。本文在自适应神经网络模糊推理技术<sup>[6]</sup>(Adaptive Neuro Fuzzy Inference System, ANFIS)的

收稿日期: 2012-09-18

基金项目: 航空科学基金资助项目(20095596014); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2009JM8001-4)

作者简介: 刘卓凡(1988-), 男, 广东梅州人, 硕士生, 主要从事通信与信息系统研究。

E-mail: 446293940@qq.com

基础上,构建了一种基于置信度加权的 INS/BD/GPS 组合导航信息融合系统。

### 1 系统结构的建立

图 1 为基于置信度加权的 INS/BD/GPS 信息融合系统,主要由局部滤波器、置信度判别器、融合权值数据库和加权融合 4 部分组成。选取惯导系统作为参考系统,与 BD、GPS 分别组合,构成 2 个子系统。子系统对获取的信息进行跟踪滤波,并将其

属性状态送到 ANFIS 置信度判别器;具有经验规则和模糊推理功能的 ANFIS 置信度判别器经过对导航数据综合判别,得到相应子系统的置信度;融合权值数据库根据各子系统置信度推理得到各自的权值;最后,对各子系统导航数据进行加权融合,得到系统融合信息并反馈给惯性导航系统,得到最终的全局输出。本融合系统利用自适应神经网络模糊推理技术,综合考虑惯导、BD、GPS 的状态、探测精度和滤波误差,实现位置参数的信息融合。

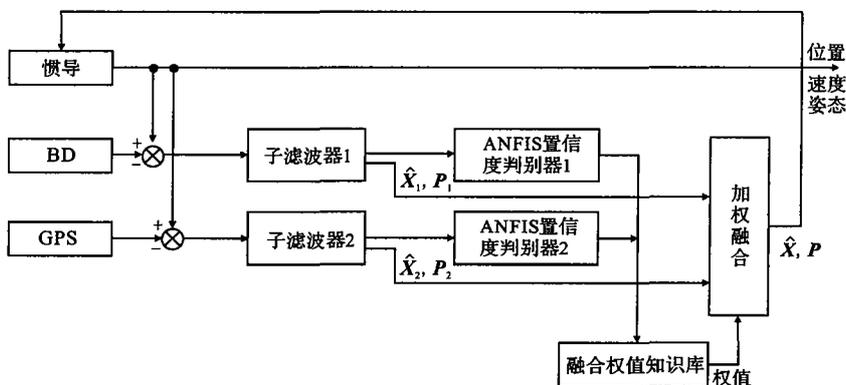


图 1 INS/BD/GPS 信息融合系统

Fig. 1 Information fusion system of INS/BD/GPS

### 2 子系统模型的建立

选择 INS 作为公共参考系统,分别与 INS 构成两个子系统。每个子系统中卡尔曼滤波器使用 INS 误差量作为状态变量,INS 与 BD、INS 的量测差分别作为两个子滤波器的观测值。INS/BD 构成子系统 1,INS/GPS 构成子系统 2,系统状态变量取为<sup>[7]</sup>:

$$X = [\Delta V_E \quad \Delta V_N \quad \Delta V_U \quad \Delta \varphi \quad \Delta \lambda \quad \Delta h \quad \phi_E \quad \phi_N \quad \phi_U \quad \epsilon_x \quad \epsilon_y \quad \epsilon_z]^T \quad (1)$$

式中: $\Delta V_E, \Delta V_N, \Delta V_U$  分别为 INS 的东向速度、北向速度和天向速度误差; $\Delta \varphi, \Delta \lambda, \Delta h$  分别为惯导系统的纬度、经度和高度误差; $\phi_E, \phi_N, \phi_U$  分别为东、北、天向平台失准角; $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$  分别为惯导 3 轴方向的陀螺漂移。系统观测方程为:

$$Z = [\Delta \varphi \quad \Delta \lambda \quad \Delta h]^T \quad (2)$$

子系统数学模型如下:

$$\begin{cases} X_k = \Phi_{k,K-1} X_{K-1} + \Gamma_{k,K-1} W_{K-1} \\ Z_k^i = H_k^i X_k + V_k^i \end{cases} \quad (3)$$

式中:上标  $i$  为第  $i$  个子系统,  $i=1,2$ ;  $X_k$  为状态向量;  $\Phi_{k,K-1}$  为状态转移矩阵;  $\Gamma_{k,K-1}$  为干扰矩阵;  $W_{K-1}$  为系统噪声向量;  $Z_k^i$  为第  $i$  个子系统的量测向

量;  $H_k^i$  为量测矩阵;  $V_k^i$  为量测噪声向量。  $W_{K-1}$  和  $V_k^i$  是不相关的高斯白噪声序列。

每个子系统输出状态  $\hat{X}_i$  及方差  $P_i$  进行加权数据融合的同时,将能够反映子系统状况的属性状态作为 ANFIS 置信度判别器的输入以获得权值。

### 3 ANFIS 置信度判别器设计

#### 3.1 ANFIS 置信度判别器结构

置信度判别器由自适应神经模糊推理系统来实现,其结构见图 2。

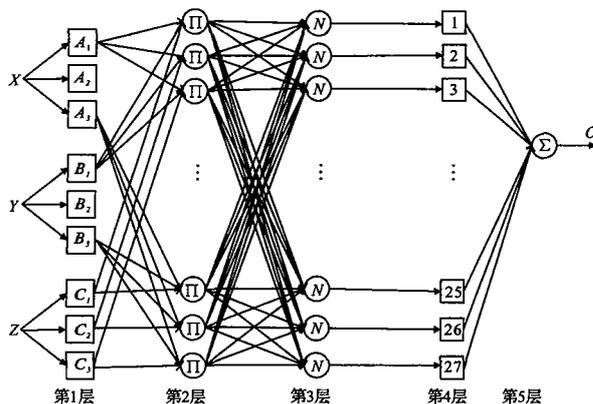


图 2 ANFIS 置信度判别器结构

Fig. 2 The framework of ANFIS confidence level discriminator

判别器分为5层<sup>[8-9]</sup>,记层1的第*i*节点的输出为 $o_{1,i}$ 。

第1层:本层参数称为前提参数。这一层的每个节点*i*都是一个有节点函数的自适应节点。节点函数是模糊集*A*的隶属函数,由它确定给定的输入*X*(或*Y*或*Z*)满足量*A*(或*B*或*C*)的程度。该层节点的输出为:

$$\begin{cases} O_{1,i} = \mu_{A_i}(X), & i=1,2,3 \\ O_{1,i} = \mu_{B_{i-3}}(Y), & i=4,5,6 \\ O_{1,i} = \mu_{C_{i-6}}(Z), & i=7,8,9 \end{cases} \quad (4)$$

式中:*X*或*Y*或*Z*为节点*i*的输入; $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 相当于“正常”、“干扰”、“破坏”; $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 相当于“高”、“中”、“低”; $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 相当于“小”、“中”、“大”; $\mu_{A_i}(X)$ ( $i=1,2,3$ )、 $\mu_{B_{i-3}}(Y)$ ( $i=4,5,6$ )、 $\mu_{C_{i-6}}(Z)$ ( $i=7,8,9$ )为相应的9个模糊集合的隶属度函数,这里采用了高斯函数:

$$\mu_{A_i}(x) = \exp\left[-\left(\frac{x-c_i}{a}\right)^2\right], \quad i=1,2,3 \quad (5)$$

式中 $\{a_i, c_i\}$ 为参数集。当这些参数的值改变时,高斯函数也随着改变。

第2层:是标记为 $\Pi$ 的固定节点,输出是所有输入信号的积:

$$O_{2,i} = \mu_{A_i}(X)\mu_{B_i}(Y)\mu_{C_i}(Z), \quad (i=1,2,3) \quad (6)$$

表示第*i*条规则的激活强度。

第3层:计算每一条规则的激励强度与所有规则的激励强度之和的比值,*N*为归一化标记,输出为归一化激励强度:

$$O_{3,i} = \frac{O_{2,i}}{\sum_{j=1}^{27} O_{2,j}}, \quad i=1,2,\dots,27 \quad (7)$$

第4层:本层参数称为结论参数。本层节点是具有节点函数的自适应节点,其节点函数包含规则结论部分的参数,计算每条规则的输出对最终结果的实际影响:

$$O_{4,i} = O_{3,i}r_i, \quad i=1,2,\dots,27 \quad (8)$$

式中 $\{r_i\}$ 为该节点的参数集。

第5层:本层只包括一个节点,这个节点是一个求和节点,它的输出即网络的总输出为该节点所有输入信号之和:

$$O_5 = \sum_{i=1}^{27} O_{4,i} \quad (9)$$

### 3.2 ANFIS 置信度判别器的模糊规则

图2中,系统包含3个输入,1个输出,27条模糊规则。对于某个子系统,判别器的输入信号*X*、*Y*、*Z*分别选取滤波器的输出状态 $\hat{X}_i$ 、方差矩阵 $P_i$ 、实际的观测值与卡尔曼的估计观测值之差 $r_k = Z_k - H_k \hat{X}_{K,K-1}$ (也称为新息)。 $\hat{X}_i$ 能综合反映滤波器数学模型内在各参数阵的工作性能,体现的是滤波器的状态;而 $P_i$ 则能够反映滤波误差,一般来说,tr( $P_i$ )越大,该子滤波器的滤波效果就越差;新息 $r_k$ 描述了滤波器的探测精度。每个输入语言变量均有3个用高斯函数表征隶属函数的模糊集合。

输出*O*是子系统的置信度,为一个取值范围为 $[0,1]$ 的实数值,值越大表示子系统的置信度越高。根据经验建立的模糊规则见表1,表1中的置信度 $r_i$ 表示通过第*i*条规则凭经验给出的子系统的置信度数值。

表1 ANFIS 置信度判别器的模糊规则

Tab.1 Fuzzy rule of ANFIS confidence level discriminator

规则号	If			Then
	子系统状态	探测精度	滤波方差	置信度
1	$A_1$ (正常)	$B_1$ (高)	$C_1$ (小)	$r_1 = 1$
2	$A_1$ (正常)	$B_1$ (高)	$C_2$ (中)	$r_2 = 0.9$
3	$A_1$ (正常)	$B_1$ (高)	$C_3$ (大)	$r_3 = 0.8$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
27	$A_3$ (破坏)	$B_3$ (低)	$C_3$ (大)	$r_{27} = 0$

## 4 融合权值知识库的设置

融合权值数据库的输入是综合考虑了子系统的状态、滤波误差以及探测精度等情况而得到的子系统的置信度。当某个子系统的置信度很高,而其他子系统的置信度较低,则应该只使用置信度很高的这个子系统的数据库,将其他子系统的权值设为0;当某个子系统的置信度很低,而其他子系统的置信度不高不低,则应该将这个子系统的权值设为0,以减少其对融合结果的影响;当所有子系统的置信度都差不多,就把所有子系统的置信度归一化后作为它们的权值。本文仿真采用的知识库如表2所示。表中, $U_1$ 、 $U_2$ 分别代表子系统1、2的置信度, $\rho_1$ 、 $\rho_2$ 、 $\rho_3$ 为规则阈值,可根据经验设定,也可经过多次实验选取最佳值。本文通过多次试验, $\rho_1$ 、 $\rho_2$ 、 $\rho_3$ 的值分别选取为0.8、0.6、0.4。

表 2 规则知识库

Tab. 2 The knowledge base of rules

规则号	规则前提(置信度判断)		规则结论(子系统权值)	
	子系统 1	子系统 2	子系统 1	子系统 2
1	$U_1 \geq \rho_1$	$U_2 \leq \rho_2$	1	0
2	$\rho_1 \geq U_1 \geq \rho_2$	$\rho_1 \geq U_2 \geq \rho_2$	$U_1 / (U_1 + U_2)$	$U_1 / (U_1 + U_2)$
3	$\rho_1 \geq U_1 \geq \rho_2$	$U_2 \leq \rho_3$	1	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

### 5 加权融合

根据各子系统的权值对他们进行加权融合。设  $W_i (i=1,2)$  分别为子系统 1 和 2 的权值,则融合后的全局估计值  $\hat{X}$  表示为:

$$\hat{X} = \sum_{i=1}^2 W_i X_i, (i=1,2) \quad (10)$$

### 6 仿真分析

仿真条件设置为:平台失准角误差  $\phi_E, \phi_N, \phi_U$  均为 0.000 2 rad;INS 初始速度误差  $\Delta V_N, \Delta V_E$  均为:0.5 m/s;INS 初始位置误差  $\Delta \varphi, \Delta \lambda$  均为

0.000 2 rad;陀螺漂移误差分量为 0.1°/h;加速度计零度位误差分量为 50  $\mu g$ 。当导航设备受到干扰或被破坏时,其探测数据用正常时的探测数据叠加方差大小不同的高斯白噪声来模拟。

仿真中比较了两种融合算法。算法 1 利用联邦卡尔曼滤波器对导航数据进行融合。算法 2 采用基于 ANFIS 置信度判别器的信息融合系统。对 ANFIS 网络进行训练,最终的训练误差为 0.054;融合权值数据库中包含了 16 个规则。

子系统 1 的状态值由 0.3 变化到 1.0,即由正常状态变化到破坏状态,子系统 2 的状态正常。仿真结果见表 3。

表 3 子系统 1 状态变化时纬度融合均方根误差

Tab. 3 Latitude fused root mean square error when the first subsystem state change

算法结果/m	子系统 1 状态值							
	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
算法 1	14	14	21	23	26	39	30	38
算法 2	15	15	21	22	22	24	23	23

图 3 分别为两个子系统均正常时、子系统 1 状态为干扰而子系统 2 的状态正常时、子系统 1 状态为破坏而子系统 2 的状态正常时的纬度误差  $\Delta \varphi$  曲线图。

从前面的仿真结果可以看出,所有的子系统均正常时,两种方法的融合误差相当。当某一子系统

由正常状态向破坏状态变化时,联邦卡尔曼滤波算法的融合误差要明显增大,而基于置信度加权的融合算法能较好地适应子系统状态的变化,能够利用所有的信息,以减少这种变化对系统数据融合的影响。

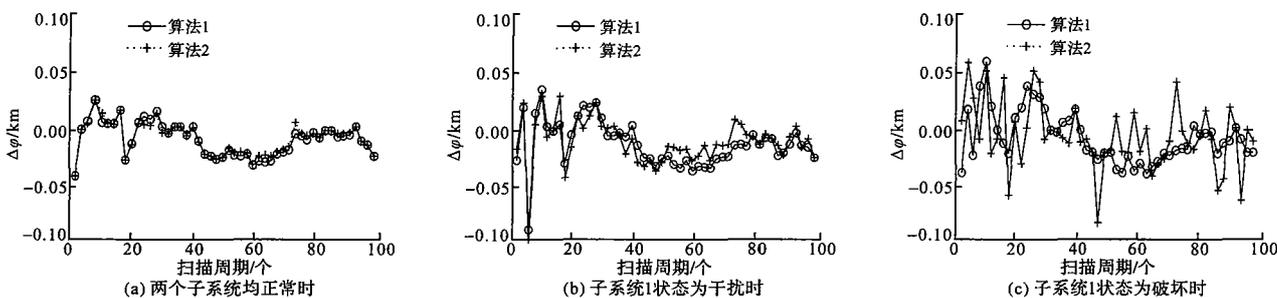


图 3 子系统 1 状态变化时的融合误差曲线

Fig. 3 Fused root mean square error graph when the first subsystem is change

## 7 结语

在组合导航系统中,若某个导航设备遭到破坏或严重干扰,将导致导航数据的发散,严重影响导航定位精度。本文利用置信度加权的方法对破坏程度进行综合判断,有选择地对导航数据进行利用,有效地解决了组合导航系统数据发散的问题。

### 参考文献(References):

- [1] Brown A K. GPS/INS uses low-cost MEMS IMU[J]. Aerospace and electronic system magazine IEEE, 2005, 20(9):3-10.
- [2] Hang Liu, Sameh Nassar, Naser Elsheing. Twofilter smoothing for accurate INS/GPS land-vehicle navigation in urban centers[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2010, 59(9):4256-4267.
- [3] 谢钢. GPS原理与接收机设计[M]. 北京:电子工业出版社, 2009.  
XIE Gang. Principles of GPS and receiver design[M]. Beijing: Publishing house of electronics industry, 2009. (in Chinese)
- [4] 许丽佳, 陈阳舟, 崔平远. 组合导航系统的模糊信息融合[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(1):124-128.  
XU Lijia, CHEN Yangzhou, CUI Pingyuan. Fuzzy information fusion in integrated navigation system[J]. Journal of system simulation, 2005, 17(1):124-128. (in Chinese)
- [5] 陈玉峰. 差分BD/GLONASS系统及其与INS组合导航关键技术研究 and 工程实现[D]. 西安:空军工程大学, 2009.  
CHEN Yufeng. Differential BD/GLONASS system and its integrated navigation key technology research and engineering realization[D]. Xi'an: Air force engineering university, 2009. (in Chinese)
- [6] Abdelazim T, Abdelhamid W, Elsheimy N, et al. Experimental results of an adaptive fuzzy network Kalman filtering integration for low cost navigation application [C]//IEEE annual meeting of the fuzzy information. [S. l.]: IEEE press, 2004:844-849.
- [7] 张国良, 曾静. 组合导航原理与技术[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2008.  
ZHANG Guoliang, ZENG Jing. Principle and technology of integrated navigation [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong university press, 2008. (in Chinese)
- [8] 卞鸿巍, 李安, 覃方君, 等. 现代信息融合技术在组合导航中的应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2010.  
BIAN Hongwei, LI An, QIN Fangjun, et al. Modern information fusion technology in the application of integrated navigation [M]. Beijing: National defence industry press, 2010. (in Chinese)
- [9] Zadeh L A. Fuzzy logic neural networks and soft Computing[J]. Communication of the ACM, 2004, 37(3):77-84.
- (编辑:田新华)
- 
- (上接第43页)
- WANG Shenshen, FENG Jinfu, WANG Fangnian, et al. Location method of near space radar network based on regularized constrained total least square[J]. Journal of electronics & information technology, 2011, 33(7):1655-1660. (in Chinese)
- [8] Markovsky I, Mahmoodi S. Least-squares contour alignment[J]. Signal processing letters IEEE, 2009, 16(1):41-44.
- [9] Yang Kai, An Jianping, Bu Xiangyuan, et al. Constrained total least-squares location algorithm using time-difference-of-arrival measurements [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2010, 59(3):1558-1562.
- [10] Hana Godrich, Alexander M, Haimovich Rick S. Target localization accuracy gain in MIMO radar-based systems[J]. IEEE transactions on information theory, 2010, 56(6):2783-2803.
- (编辑:田新华)