

## 基于模糊自适应Kalman滤波的GPS/DR数据融合

唐磊, 赵春霞, 唐振民, 成伟明, 张浩峰

(南京理工大学 计算机科学与技术学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 针对标准Kalman滤波器对系统模型依赖性强、鲁棒性差, 而GPS/DR系统的准确数学模型难以建立的问题, 提出了一种模糊自适应联邦卡尔曼滤波器(FAFKF). 首先通过模糊自适应滤波控制器监控观测量的残差理论值和实际值, 并通过实时增强它们的一致性来调整各子系统观测噪声方差阵, 使之更符合真实的模型, 有效提高了Kalman滤波器对模型变化的适应能力. 然后通过模糊自适应信息融合控制器对各子系统可信度进行模糊评判, 并根据可信度自适应地计算信息分配系数来实现数据的融合. 理论分析和实验数据表明该滤波器在滤波精度、容错性能上都有了很大的提高.

**关键词:** GPS/DR; 联邦Kalman滤波器; 模糊自适应; 数据融合

**中图分类号:** O211 **文献标识码:** A

## GPS/DR data fusion based on fuzzy adaptive Kalman filter

TANG Lei, ZHAO Chun-xia, TANG Zhen-min, CHENG Wei-ming, ZHANG Hao-feng

(Department of Computer Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210094, China)

**Abstract:** Standard Kalman filter strongly depends on the system model. Unfortunately, an accurate mathematical model of GPS(global positioning system)/DR(dead reckoning) system is difficult to set up, so a fuzzy adaptive federated Kalman filter (FAFKF) is presented for the problem. First, a real-time fuzzy adaptive filter controller is used to monitor the real value and theoretical value of residual covariance, and adjust the covariance matrices of observation noises towards the real model by enhancing their consistencies. As a result, the Kalman filter's tolerance to model error is improved. Then a fuzzy adaptive data fusion controller is used to evaluate the reliability of each subsystem, and the information distribution coefficients of each subsystem is computed according to the reliability. Theoretical analysis and experimental data show that both the precision and fault tolerance of FAFKF are improved.

**Key words:** GPS/DR; federated Kalman filter; fuzzy adaptive; data fusion

### 1 引言(Introduction)

随着现代人工智能技术的发展, 智能车辆、高精度武器等的导航定位系统精度和可靠性要求越来越高. 全球定位系统(GPS)可以提供全天候、实时的高精度定位信息, 但GPS信号容易受到遮挡和电磁波的干扰, 导致定位信息失效. 航迹推算(DR)的定位方法采用自定位传感器, 不依赖于外界信号, 能够输出连续稳定的定位信息, 传感器的价格也比较低廉, 但它的误差随时间积累而导致精度迅速降低. GPS/DR组合导航系统充分发挥了二者的优点, 克服了缺点, 具有互补性, 是当前应用最为广泛的组合导航系统<sup>[1]</sup>.

如何将GPS, DR的数据进行有效的融合, 是决定GPS/DR组合导航系统精度的一个关键问题. 采用

联邦Kalman滤波器(federated Kalman filter, FKF)的融合方法是当前应用最为成功的多传感器数据融合方法<sup>[2]</sup>, 它具有运算效率高, 适用范围广等优点. 但是, 该方法要求准确建立系统的数学模型, 而且没有考虑到误差模型的变化, 具有记忆的效果, 容易造成滤波精度下降甚至滤波发散<sup>[3]</sup>. 由于GPS信号易受环境影响而发生变化, 而且DR系统中的航向传感器(如磁罗盘)也容易受到电磁波以及移动载体本身的电流和线圈的干扰而导致精度变化, 因此GPS/DR系统的数学模型是频繁变化的, FKF方法不适合直接应用于GPS/DR系统.

针对标准Kalman滤波器对系统模型依赖性强、鲁棒性差的不足, 国内外学者提出了一些自适应滤波的方法. 渐消记忆滤波法<sup>[4,5]</sup>通过在滤波

中引入渐消记忆因子,减少过时的数据对现时状态的影响,从而使系统模型接近于当前实际模型,但如何选取合适的渐消记忆因子是该方法面临的一个难题.基于模糊逻辑的自适应滤波方法是目前在实际应用中较为成功的一种<sup>[6,7]</sup>.在数据融合上,按矩阵加权的方法是长期使用的一种方法<sup>[8]</sup>,经典的联邦Kalman滤波器采用的就是该方法<sup>[9]</sup>,但该方法复杂度高,不满足导航系统的实时要求.也有学者对基于模糊逻辑的数据融合方法进行研究<sup>[10]</sup>.

本文在现有的基于模糊逻辑的自适应滤波及数据融合方法上,通过深入分析Kalman滤波器的滤波原理,并结合GPS/DR系统的特点,设计了模糊自适应联邦Kalman滤波器(fuzzy adaptive federated Kalman filter, FAFKF),并通过基于移动机器人平台的实验验证了滤波器的有效性.

## 2 GPS/DR系统数学模型(Mathematic model of GPS/DR system)

### 2.1 系统状态方程(System state equations)

令 $X_1 = X_2 = [e \ v_e \ a_e \ n \ v_n \ a_n \ \varepsilon_e \ \varepsilon_n \ q_w \ q_s]$ ,其中: $X_1, X_2$ 分别表示GPS子系统状态向量、DR子系统状态向量; $e, n$ 分别为移动平台的东向和北向位置; $v_e, v_n$ 分别为移动平台东向和北向的速度分量; $a_e, a_n$ 分别为移动平台的东向和北向加速度分量; $\varepsilon_e, \varepsilon_n$ 为各种误差源在移动平台东向和北向位置上造成的误差; $q_w$ 为电磁罗盘随机干扰误差, $q_s$ 为里程计测量误差.建立系统状态方程

$$X_i(k) = \Phi(k-1)X_i(k-1) + W(k-1). \quad (1)$$

式(1)中: $i = 1, 2$ ,  $\Phi(k)$ 表示状态转移矩阵,且

$$\Phi(k) = \text{diag}\{\Phi_e(T_g), \Phi_n(T_g), e^{-\frac{T_g}{\tau_{\varepsilon 1}}}, e^{-\frac{T_g}{\tau_{\varepsilon 2}}}, I_{2 \times 2}\}. \quad (2)$$

其中:

$$\Phi_e(T_g) = \Phi_n(T_g) = \begin{bmatrix} 1 & T_g & T_g^2 \\ 0 & 1 & T_g \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad I_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$T_g$ 代表GPS输出周期, $\tau_{\varepsilon 1}, \tau_{\varepsilon 2}$ 分别为电磁罗盘和里程计漂移误差的一阶马尔可夫过程时间相关常数; $W(k)$ 为系统过程噪声,是均值为零、协方差为 $Q(k)$ 的高斯白噪声.

### 2.2 系统观测方程(System observation equations)

对于GPS子系统,取观测向量

$$Z_1(k) = [e(k) \ n(k)]^T, \quad (4)$$

建立其观测方程

$$Z_1(k) = H_1(k)X_1(k) + V_1(k). \quad (5)$$

式(5)中

$$H_1(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$V_1(k)$ 是系统观测噪声,是均值为零、协方差为 $R_1(k)$ 的高斯白噪声.

对于DR子系统,取观测向量

$$Z_2(k) = [\Theta(k) \ S(k)]^T. \quad (7)$$

其中 $\Theta$ 和 $S$ 分别为陀螺输出和里程计输出.观测值 $Z_2(k)$ 可写为

$$Z_2(k) = \begin{bmatrix} \arg \frac{v_e(k)}{v_n(k)} + q_w \\ T_m \sqrt{v_e^2(k) + v_n^2(k)} + q_s \end{bmatrix}. \quad (8)$$

其中 $T_m$ 代表里程计的输出周期.由于DR局部滤波器中观测方程为非线性,需先进行线性化处理.采用EKF(扩展Kalman滤波)线性化后的DR子系统观测方程

$$Z_2(k) = H_2(k)X_2(k) + V_2(k). \quad (9)$$

式(9)中

$$H_2(k) = \begin{bmatrix} 0 & h_1(k) & 0 & 0 & h_2(k) & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & h_3(k) & 0 & 0 & h_4(k) & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

其中:

$$h_1(k) = \frac{v_n}{v_e^2 + v_n^2} \Big|_{\hat{X}(k|k-1)}, \quad (11)$$

$$h_2(k) = \frac{-v_e}{v_e^2 + v_n^2} \Big|_{\hat{X}(k|k-1)}, \quad (12)$$

$$h_3(k) = \frac{T_m v_e}{v_e^2 + v_n^2} \Big|_{\hat{X}(k|k-1)}, \quad (13)$$

$$h_4(k) = \frac{T_m v_n}{v_e^2 + v_n^2} \Big|_{\hat{X}(k|k-1)}, \quad (14)$$

$V_2(k)$ 为系统观测噪声,是均值为零、协方差为 $R_2(k)$ 的高斯白噪声.

## 3 模糊自适应滤波(Fuzzy adaptive filter)

在Kalman滤波器中,定义在 $k$ 时刻获得的系统 $i$  ( $i = 1, 2$ )的观测量 $Z_i(k)$ 与系统的一步预测 $\hat{Z}_i(k, k-1)$ 之间的误差

$$r_i(k) = Z_i(k) - \hat{Z}_i(k, k-1) = Z_i(k) - H_i(k)\hat{X}_i(k, k-1) \quad (15)$$

为残差.为了使系统观测噪声模型更接近于真实情况,以提高滤波精度,抑制滤波发散,可以通过方差匹配技术(covariance-matching),增强残差的理论协方差阵和实际协方差阵的一致性来实现<sup>[6]</sup>.残差的

实际协方差阵 $Ra_i(k)$ 的计算式为

$$Ra_i(k) = \frac{1}{M} \sum_{k=t-M+1}^k r_i(t)r_i^T(t), \quad (16)$$

$M$ 是一经验参数,表示用来计算实际协方差阵的窗口大小,一般取20左右.理论协方差阵 $Te_i(k)$ 的计算式为

$$Te_i(k) = H_i(k)P(k, k-1)H_i^T + R_i(k). \quad (17)$$

设

$$Dis_i(k) = Te_i(k) - Ra_i(k). \quad (18)$$

由 $Te_i(k)$ 定义可知其值可以通过改变 $R_i(k)$ 来改变,从而调整它与 $Ra_i(k)$ 的一致性.设 $R_i(k)$ 增量为 $\Delta R_i(k)$ ,易知 $Dis_i(k)$ 和 $\Delta R_i(k)$ 维数相同.本文设计的模糊自适应滤波控制器,以 $Dis_i(k)$ 中对角元依次作为输入,其输出作为相应位置的 $\Delta R_i(k)$ 中值.用 $I$ 代表输入, $O$ 代表输出,定义如下的模糊控制规则:

- 1) 若 $I = NL$ (负大),则 $O = PL$ (正大);
- 2) 若 $I = NS$ (负小),则 $O = PS$ (正小);
- 3) 若 $I = ZO$ (零),则 $O = ZO$ (零);
- 4) 若 $I = PS$ (正小),则 $O = NS$ (负小);
- 5) 若 $I = PL$ (正大),则 $O = NL$ (负大).

各输入输出的模糊隶属度函数根据其对应观测向量的不同单位以及传感器的不同精度进行经验定义.经过模糊推理及反模糊化过程获得 $\Delta R_i(k)$ 值并修正 $R_i(k)$ ,使 $R_i(k)$ 更接近于真实的模型,从而抑制滤波发散,提高滤波精度.

#### 4 模糊自适应数据融合(Fuzzy adaptive data fusion)

利用Kalman滤波器实现多个传感器的信息融合的形式主要有集中式和分布式两种.集中式的Kalman滤波器将各个传感器的数据集中处理,导致系统维数高,计算负担重,而且滤波器的容错能力差.分布式滤波技术就是为了解决集中式Kalman滤波器的上述缺陷提出的.FKF是分布式Kalman滤波器中的一种.

在具体的实现形式上,根据信息分配和反馈的方式不同,分布式滤波可分为无反馈模式(NR)、融合-反馈模式(FR)、零复位模式(ZR)、变比例模式(RS)4种.综合考虑系统的运算效率、容错性能以及子滤波器到主滤波器的融合算法易于实现等因素,FAFKF采用NR模式,即主滤波器按照信息分配系数完成各子系统数据的融合,但不再进行信息反馈,这样可以有效防止误差的反向传播.融合算法的计算公式为

$$\hat{X}(k) = \beta_1 \hat{X}_1(k) + \beta_2 \hat{X}_2(k), \quad \beta_1 + \beta_2 = 1. \quad (19)$$

式中的 $\beta_1, \beta_2$ 表示信息分配系数,数据融合算法的优劣关键在于信息分配系数选择的优劣.本文设计了一个模糊自适应信息融合控制器计算各子系统的信息分配系数.

由于估计误差方差阵 $P_i$ 大小可以反映滤波质量的优劣,可以选择 $PE_i = \text{tr}(P_i(k)P_i(k)^T)$ 作为一个评价因素.另外,由本文上节所述, $Dis_i(k)$ 同样也能够反映滤波质量优劣,因此可以将 $DE_i = \text{tr}(Dis_i(k)Dis_i(k)^T)$ 也作为一个评价因素,将这两个评价因素作为模糊自适应信息融合控制器的输入.定义它们的模糊子集为

{VB(大), NB(较大), NS(较小), VS(小), ZO(零)}.

它们的模糊隶属度函数也需根据不同的情况来经验定义.该控制器的输出为 $W_i$ ,表示各子系统可信度,其论域范围为[0,1],定义它的模糊子集为

{VL(低), NL(较低), M(中), NH(较高), VH(高)}.

其模糊隶属度函数如图1所示.图中:横坐标表示可信度,纵坐标表示模糊隶属度.

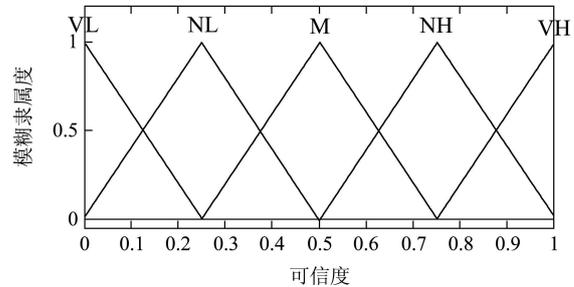


图1 可信度模糊隶属度函数

Fig. 1 Reliability fuzzy membership function

根据经验,定义如表1所示的模糊规则.

表1 模糊控制规则

Table 1 Fuzzy control rules

$PE_i$	$DE_i$				
	VB	NB	NS	VS	ZO
VB	VL	VL	NL	M	M
NB	VL	NL	NL	M	NH
NS	NL	NL	M	M	NH
VS	M	M	M	NH	VH
ZO	M	NH	NH	VH	VH

通过模糊推理和重心法反模糊化,计算出各子系统的可信度权值 $W_1$ 和 $W_2$ 之后,用下式进行信息分配系数的计算:

$$\beta_1 = \frac{W_1}{W_1 + W_2}, \quad \beta_2 = \frac{W_2}{W_1 + W_2}. \quad (20)$$

综上所述,本文设计的模糊自适应联邦Kalman滤波器算法描述框图如图2所示.

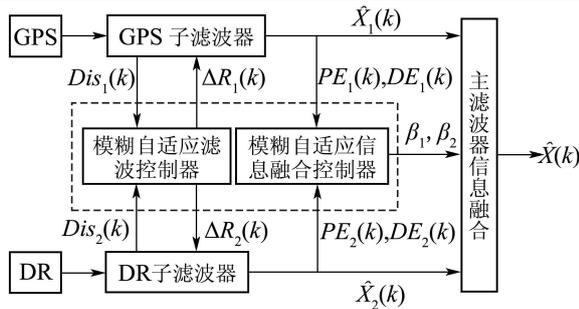


图2 模糊自适应联邦Kalman滤波器结构框图

Fig. 2 Framework of FAFKF

## 5 实验结果及分析(Experimental results and analysis)

为验证FAFKF的有效性, 本文在移动机器人平台上设计了两组实验来对FAFKF和FKF的滤波效果进行对比. 两组实验均在南京理工大学校园内进行, 采用的GPS系统为差分GPS系统. 由于校园内的高大建筑物的影响, GPS出现频繁的失星、锁星现象, 精度也随之不停的变化. 而且由于电磁波辐射以及移动平台本身电流、线圈的影响, 导致电磁罗盘的数据精度也发生变换, 因此两个子系统的误差模型是随环境的改变而不断变化.

在第1组实验中, 选定一南北走向的直线(该直线的准确东向位置预先多次测量获取), 将移动平台沿该直线行走约150m, 并同时记录两个滤波器输出的北向位置. 实验中共获取437组数据, 从中随机抽取100组数据并分别计算它们的误差, 实验对比结果如图3所示. 从图中可以看出, FKF的滤波值误差明显较FAFKF大. 经计算, 在这100组数据中, FKF的滤波值方差为77.59 cm, FAFKF的滤波值方差为34.91 cm.

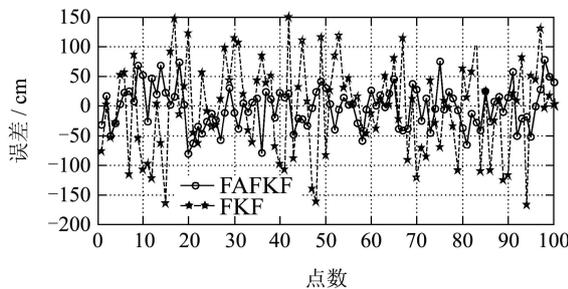


图3 FAFKF与FKF的滤波误差对比

Fig. 3 Comparison of the errors between FAFKF and FKF

在第2组实验中, 将移动平台沿学校图书馆行走, 从东南角开始, 逆时针方向行走一周, 也同时记录两个滤波器的滤波值. 获取的滤波后运动轨迹对比如图4所示. 从图中可以看出, FKF由于收到模型误差的影响, 其滤波值的精度明显下降, 轨迹与真实值出现多处明显偏差. 而FAFKF滤波值轨迹光滑, 与真实轨迹很接近.

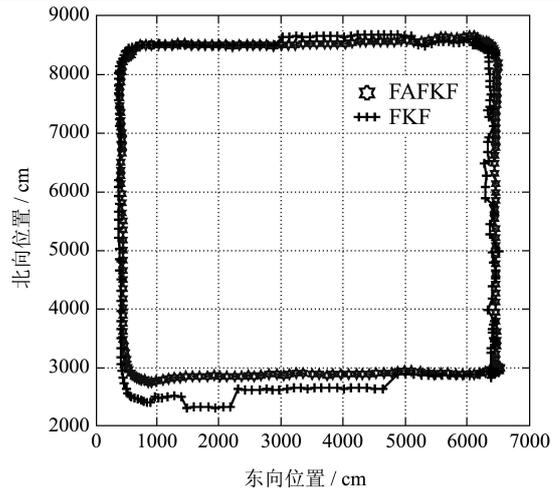


图4 FAFKF与FKF的滤波轨迹对比

Fig. 4 Comparison of the tracks between FAFKF and FKF

## 6 结论(Conclusions)

本文通过模糊理论与联邦Kalman滤波技术的结合, 设计了一种模糊自适应联邦Kalman滤波器, 对GPS/DR组合导航系统数据进行了有效的融合. 该滤波器在精度和容错性能上都取得了令人满意的效果. 在计算量上, 模糊推理系统的引入能增加计算量, 但是在信息分配系数的计算上由于不需进行复杂的矩阵运算, 总体计算量上没有太大增加, 而是和标准的联邦Kalman滤波器相当, 可以满足实时导航系统的需求.

## 参考文献(References):

- [1] YANG Yanjuan, JIN Zhihua. Application of fixed interval smoothing to GPS/DR integrated navigation system[C]//Proc of IEEE Int Intelligent Transportation System. Shanghai, China: IEEE Press, 2003, 2: 1027 - 1031.
- [2] 郑利龙, 曹志刚. GPS组合导航系统的数据融合[J]. 电子学报, 2002, 30(9): 1384 - 1386.  
(ZHENG Lilong, CAO Zhigang. Data fusion of GPS integrated navigation system[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(9): 1384 - 1386.)
- [3] TIANO A, ZIRILLI A. Application of interval and fuzzy techniques to integrated navigation system[C]//IFSA World Congress and the 20th NAFIPS Int Conf. [S.l.]: [s.n.], 2001: 13 - 18.
- [4] GENG Yanrui, CUI Zhongxing. Adaptive fading Kalman filter with applications in integrated navigation system[J]. J of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(5): 434 - 437.
- [5] ZHANG Jing, JI Zhihua, TIAN Weifeng. A suboptimal Kalman filter with fading factors for DGPS/MEMS-IMU/magnetic compass integrated navigation[C]//Proc of IEEE Int Intelligent Transportation System. Shanghai, China: IEEE Press, 2003, 2: 12 - 15.
- [6] ESCAMILLA P J, MORT N. Multisensor data fusion architecture based on adaptive Kalman filters and fuzzy logic[C]//Proc of the fifth Int Conf on Information Fusion, Annapolis, Maryland, USA. [S.l.]: [s.n.], 2002, 2: 1542 - 1549.
- [7] SASIADEK J Z, WANG Q, ZEREMBA M B. Fuzzy adaptive Kalman filtering for INS/GPS data fusion[C]//Proc of IEEE Int Symposium on Intelligent Control, Rio, Patras, Greece. [S.l.]: [s.n.], 2000: 181 - 186.

(下转第908页)