

doi: 10.7690/bgzdh.2021.03.007

基于互补-粒子滤波的 MEMS 传感组件姿态数据融合算法

许甜甜¹, 赵宝旭², 骆云志¹

(1. 中国兵器装备集团自动化研究所有限公司武器装备信息与控制技术创新中心, 四川 绵阳 621000;
2. 陆军装备部防化军事代表局, 北京 100083)

摘要: 为解决现有的 MEMS 传感组件精度低、误差大和磁传感器测量的航向角数据噪声大、精度低等问题, 提出基于互补-粒子滤波的姿态融合解算方法。先用互补滤波算法结合加速计和磁力计对陀螺仪的姿态角进行修正, 再采用四元素法对陀螺仪数据进行粒子滤波。仿真实验结果证明: 该算法能快速解算出姿态角, 提高解算精度。

关键词: 组合导航; 粒子滤波; 数据融合

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A

Attitude Data Fusion Algorithm for MEMS Sensor Component Based on Complementary-particle Filter

Xu Tiantian¹, Zhao Baoxu², Luo Yunzhi¹

(1. *Weapon Equipment Information & Control Technology Innovation Center, Automation Research Institute Co., Ltd. of China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China;*
2. *Chemical Defense Military Representative Bureau, Army Armament Department, Beijing 100083, China*)

Abstract: In order to solve the problems of low precision and large error of MEMS sensor components and high noise and low accuracy of heading angle data measured by magnetic sensor, a method of attitude fusion based on complementary particle filter is proposed. Firstly, the attitude angle of gyroscope is corrected by using complementary filtering algorithm combined with accelerometer and magnetometer, and then particle filtering is performed on gyroscope data by using four element methods. The simulation results show that the algorithm can quickly calculate the attitude angle and improve the calculation accuracy.

Keywords: integrated navigation; particle filter; data fusion

0 引言

由 MEMS 传感组件和磁力计组成的组合姿态测量系统是目前使用最广泛的导航系统之一, 但组合系统中基于 MEMS 的陀螺仪存在漂移误差。随着载体运行时间越长, 偏离基准位置的角度越大, 导航精度越低^[1], 同时磁力计受周围环境中磁介质的影响会导致结果误差大; 因此, 需要将 MEMS 传感组件和磁力计数据进行融合。

目前使用最多的姿态数据融合算法有卡尔曼滤波^[2]、粒子滤波^[3]与互补滤波^[4]。卡尔曼滤波的系统噪声和观测噪声不易确定, 结果容易受噪声干扰; 粒子滤波解算过程复杂, 但是可以处理非线性非高斯系统的状态估计问题; 互补滤波算法简单, 但是解算结果精度不高。笔者提出了基于互补-粒子滤波融合姿态解算算法, 先利用互补滤波算法根据加速计与磁力计对陀螺仪的姿态角数据进行互补滤波, 再用粒子滤波算法对陀螺仪解算到的四元素进行滤

波处理, 以解决上述问题。

1 姿态解算方法

基于 MEMS 传感组件的姿态角解算有 2 种方法: 1) 用磁力计和加速计采用欧拉角法进行联合解算; 2) 用陀螺仪采用四元素法进行解算。

1.1 磁力计组合 MEMS 加速计姿态解算

运用加速计和磁力计结合的方法解算姿态角, 俯仰角和横滚角可以通过加速计得来, 航向角由加速计得到的横滚角与俯仰角加上磁力计数据解算得到, 加速计在静止状态下 3 个轴检测到矢量值的平方和等于地球重力加速度大小。加速计在地理坐标系下的 3 个分量为 $[0, 0, g]^T$, 假设加速计在载体坐标系上的 3 个分量为 $[g_{bx}, g_{by}, g_{bz}]^T$, 由式(1)、式(2)可以求得俯仰角和横滚角:

$$\beta = \sin^{-1}(-g_{bx}/g); \quad (1)$$

$$\gamma = \tan^{-1}(g_{by}/g_{bz})。 \quad (2)$$

收稿日期: 2020-10-16; 修回日期: 2020-12-11

作者简介: 许甜甜(1995—), 女, 四川人, 硕士, 从事嵌入式智能设备研究。E-mail: 1024301110@qq.com。

设磁传感器测量到的磁场矢量值在导航坐标系下表示为 $[m_{bx}, m_{by}, m_{bz}]^T$ ，根据下式可解算到航向角：

$$\alpha = -\tan^{-1}\left(\frac{m_{by} \cos \gamma + m_{bz} \sin \gamma}{m_{bx} \cos \beta + m_{by} \sin \beta \sin \gamma + m_{bz} \cos \beta \cos \gamma}\right)。(3)$$

1.2 基于四元素的 MEMS 陀螺仪姿态解算

四元素法得到姿态角的算法流程：通过加速计和磁力计解算出来的姿态角求得四元素的初值 $Q_0=[q_0, q_1, q_2, q_3]^T$ 。根据陀螺仪的输出信息计算四元素微分方程，得到更新的姿态四元素，再将该姿态四元素转换为相应的余弦矩阵。由地理坐标系到载体坐标系的四元素矩阵和旋转矩阵之间的对应关系，可求得载体姿态角：

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{2(q_2 q_1 + q_0 q_3)}{q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2};(4)$$

$$\beta = \sin^{-1}(2(q_2 q_0 - q_1 q_3));(5)$$

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{2(q_2 q_3 + q_0 q_1)}{q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2}。(6)$$

2 数据融合

2 种解算姿态角的方法有一个共同的问题是单独解算出来的姿态角精度低、误差大，笔者采用互补-粒子滤波融合姿态解算算法来解决这个问题。其主要指导思想是：先对磁力计与加速计联合解算的姿态角与陀螺仪的姿态角进行互补滤波，再采用粒子滤波算法根据互补滤波后姿态角转换成的四元素对陀螺仪测得姿态四元素进行修正，并将姿态四元素转换成姿态角。

2.1 互补滤波

互补滤波通过加速计和磁力计解算出来的姿态角对陀螺仪姿态角输出进行补偿，能对具有不同频率特征的噪声取长补短，并抑制或消除噪声干扰，算法简单高效且易于实现。

陀螺仪的动态响应性好，但在计算姿态时，时间久了会产生累积误差，使得解算出来的姿态出现漂移。由磁力计和加速度计解算的姿态不会有累积误差，但这 2 个传感器的动态响应性较差。他们在频域上具有互补性，可利用互补滤波原理对陀螺仪测得姿态角进行高通滤波，对加速度计测得姿态角进行低通滤波，得到在高频段和低频段都较好的信号，提高测量精度和系统的动态性能^[5]。

假设 $[\alpha_m, \beta_a, \gamma_a]^T$ 表示由磁力计和加速计解算出

来的姿态角； $[\alpha_g, \beta_g, \gamma_g]^T$ 表示由陀螺仪解算出来的姿态角； $[\alpha, \beta, \gamma]^T$ 表示经过互补滤波解算以后得到的最终姿态角。具体算法公式如下式所示：

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} = (1-k) \begin{pmatrix} \alpha_m \\ \beta_a \\ \gamma_a \end{pmatrix} + k \begin{pmatrix} \alpha_g \\ \beta_g \\ \gamma_g \end{pmatrix}。(7)$$

式中 k 的取值涉及信任度的问题，即载体在何种状态信任加速计和磁力计或者陀螺仪的一个权值大小，对几个不同时间常数 t ，根据下式计算出 k 值，然后拟合角度曲线，找到一个最优 k 值。

$$k = t / (t + dt)。(8)$$

2.2 粒子滤波

粒子滤波 (particle filtering) 算法是最近兴起的一种很有潜力的非线性滤波方法，基本原理是利用状态空间中的随机样本来近似后验概率密度函数，并依据蒙特卡罗估计方法估计状态值。

2.2.1 粒子滤波的状态方程和观测方程

为了实现粒子滤波，首先建立姿态解算非线性状态空间模型：

$$X_k = f(X_{k-1}) + W_{k-1};(9)$$

$$Y_k = h(X_k) + V_k。(10)$$

选取四元素参数作为状态空间模型的状态变量 $X_k=[q_0, q_1, q_2, q_3]^T$ ，假设系统的计算步距为 T ， W_k 为系统的状态噪声， V_k 为系统的观测噪声，且 V_k 和 W_k 相互独立。由四元素更新方程得到状态方程中

$$f(\bullet) = \begin{pmatrix} 1 & -T^* \omega_x / 2 & -T^* \omega_y / 2 & -T^* \omega_z / 2 \\ T^* \omega_x / 2 & 1 & T^* \omega_z / 2 & -T^* \omega_y / 2 \\ T^* \omega_y / 2 & -T^* \omega_z / 2 & 1 & T^* \omega_x / 2 \\ T^* \omega_z / 2 & T^* \omega_y / 2 & -T^* \omega_x / 2 & 1 \end{pmatrix}。(11)$$

取由互补滤波后的姿态角转换的四元素向量 $Y_k=[q_0, q_1, q_2, q_3]^T$ 作为观测向量，则系统观测方程为

$$Y_k = h(X_k) + V_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{pmatrix} + V_k。(12)$$

2.2.2 粒子滤波算法

粒子滤波算法归纳如下：

1) 初始状态：由所求得的状态变量先验概率来得到初始状态的粒子集 $\{X_0^i\}_{i=1}^N$ ，同时把全部的粒子权值设置为 $1/N$ 。

2) 更新：计算 k 时刻粒子集的权值并更新权值

$$w_k^i = w_{k-1}^i p(y_k/x_k^i) \quad (13)$$

对粒子权值进行归一化处理

$$w_k^i = w_k^i / \sum_{i=1}^N w_k^i \quad (14)$$

计算粒子集的加权和估计状态变量当前时刻的状态值

$$x_k = \sum_{i=1}^N w_k^i x_k^i \quad (15)$$

3) 重采样：对粒子集进行采样获得新的粒子集 $\{X_0^i\}_{i=1}^N$ 。

4) 预测：根据状态转移函数预测下一刻变量状态。

5) 令 $k=k+1$ ，得观测值后转第 2)步。

3 仿真结果

基于上述思想搭建一个测试平台，将开发板固定在精度为 0.01° 的三轴转台上，并将 MEMS 传感组件和磁力计通过开发板连接到电脑，通过串口调试助手将传感器获取到的数据传输到上位机，通过 Matlab 软件进行编程，搭建的测试平台如图 1 所示。

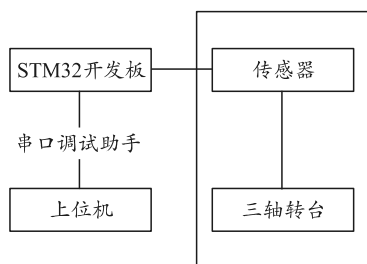


图 1 测试平台

让转台姿态动态变化，对传感器姿态角以 10 Hz 的频率进行采样，采样时间为 60 s，将滤波后的姿态角与三轴转台输出的姿态角进行对比，均

方误差结果如表 1 所示。

表 1 姿态角滤波后均方误差 (°)

姿态角	互补滤波	粒子滤波	粒子-互补滤波
航向角	4.26	3.68	0.93
俯仰角	3.74	3.28	0.41
横滚角	2.84	3.19	0.36

由表可以看出：采用单独的粒子滤波算法或互补滤波算法后，航向角误差在 5° 以内，俯仰角和横滚角误差在 4° 以内，滤波效果还不够理想，将 2 种滤波算法进行结合后，航向角误差控制在 1° 以内，俯仰角和横滚角误差都可以控制在 0.5° 以内，更逼近真实的姿态角。结果证明，与单独的粒子滤波或互补滤波相比，组合滤波有更好的精度和可信度。

4 结束语

实验结果表明：基于互补滤波和粒子滤波的姿态角解算算法可有效地提高姿态角解算精度，与传统滤波算法相比还能够抑制各种噪声，与单独的粒子滤波或者互补滤波相比具有更高的精度和可靠性。

参考文献：

[1] 杨奕飞. 船舶综合导航多源信息融合技术研究[D]. 镇江：江苏科技大学, 2013: 32-34.

[2] 吴涛, 白茹, 朱礼尧, 等. 基于卡尔曼滤波的航姿参考系统设计[J]. 传感技术学报, 2016, 29(4): 531-535.

[3] 乔相伟, 周卫东, 吉宇人. 基于四元素粒子滤波的飞行器姿态估计算法研究[J]. 兵工学报, 2012, 33(9): 1070-1075.

[4] 吕印新, 肖前贵, 胡寿松. 基于四元素互补滤波的无人机姿态解算[J]. 燕山大学学报, 2014, 38(2): 175-180.

[5] 李二闯, 张建杰, 袁亮, 等. 基于四元素互补滤波的小型四旋翼姿态解算[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(3): 37-39.

[6] 陈旭, 胡建旺. 网络信息体系下指挥信息系统建设分析与思考[C]//第七届中国指挥控制大会论文集. 北京: 兵器工业出版社, 2019: 10-14.

[7] 宋建宇, 褚孔统. 云计算架构及应用[J]. 指挥信息系统与技术, 2013, 4(5): 46-49.

[8] 戴剑伟, 王刚. 指挥信息系统云架构[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(2): 76-78.

[9] 邓克波, 梁汝鹏, 章华平, 等. 基于云服务的联合训练体系[J]. 指挥信息系统与技术, 2019, 10(4): 14-21.

[10] 孙海洋, 张安, 高飞. 云协同中作战资源两阶段虚拟化方法[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(5): 1036-1042.

[11] 严红, 万谦. 战术指挥信息系统服务化架构[J]. 指挥信息系统与技术, 2013, 4(6): 37-41.

[12] 贾婷婷, 李荣宽, 汪敏, 等. 基于轻量级容器技术的战术微云框架[J]. 指挥信息系统与技术, 2017, 8(3): 87-92.

[13] 尚小东, 张煜, 郭成昊. 基于作战任务优先级的容器云弹性伸缩系统[J]. 指挥信息系统与技术, 2020, 11(3): 36-43.

[14] 金欣. 指挥控制智能化现状与发展[J]. 指挥信息系统与技术, 2017, 8(4): 10-18.

(上接第 4 页)

[6] 陈旭, 胡建旺. 网络信息体系下指挥信息系统建设分析与思考[C]//第七届中国指挥控制大会论文集. 北京: 兵器工业出版社, 2019: 10-14.

[7] 宋建宇, 褚孔统. 云计算架构及应用[J]. 指挥信息系统与技术, 2013, 4(5): 46-49.

[8] 戴剑伟, 王刚. 指挥信息系统云架构[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(2): 76-78.

[9] 邓克波, 梁汝鹏, 章华平, 等. 基于云服务的联合训练体系[J]. 指挥信息系统与技术, 2019, 10(4): 14-21.

[10] 孙海洋, 张安, 高飞. 云协同中作战资源两阶段虚拟