

基于递推最小二乘与互补滤波的姿态估计

陈光武^{1,2†}, 李少远³, 李文元^{1,2}, 王迪^{1,2}, 张琳婧^{1,2}

(1. 兰州交通大学 自动控制研究所, 甘肃 兰州 730070;

2. 甘肃省高原交通信息工程及控制重点实验室, 甘肃 兰州 730070; 3. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 针对基于微机电系统(MEMS)的惯性导航系统中陀螺噪声较大导致姿态漂移的问题, 本文基于递推最小二乘(RLS)与互补滤波器提出一种提高姿态估计精度的方法. 该方法从陀螺去噪算法和姿态解算原理两个方面提高姿态估计精度: 在陀螺去噪方面, 为克服传统递推最小二乘的不足, 提出一种随机加权的递推最小二乘法, 利用随机加权实现对偏差的估计; 在姿态解算方面, 在传统互补滤波器的基础上通过自适应调整比例-积分(PI)参数来调整滤波器的交接频率, 最终得到陀螺积分值的高通滤波和加速度计的低通滤波的叠加. 转台静态和动态实验结果表明, 使用本文所提方法后, 有效降低了陀螺噪声, 姿态估计精度明显提升.

关键词: 微机电系统; 惯性导航; 递推最小二乘法; 互补滤波器

引用格式: 陈光武, 李少远, 李文元, 等. 基于递推最小二乘与互补滤波的姿态估计. 控制理论与应用, 2019, 36(7): 1096 – 1103

DOI: 10.7641/CTA.2018.80359

Attitude estimation based on recursive least square and complementary filtering

CHEN Guang-wu^{1,2†}, LI Shao-yuan³, LI Wen-yuan^{1,2}, WANG Di^{1,2}, ZHANG Lin-jing^{1,2}

(1. Automatic Control Research Institute, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu 730070, China;

2. Gansu Provincial Key Laboratory of Traffic Information Engineering and Control, Lanzhou Gansu 730070, China;

3. Electronic Information and Electrical Engineering Institute, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Aiming at the problem of attitude drift caused by gyroscope noise in inertial navigation system based on micro-electromechanical system (MEMS), a method to improve attitude estimation based on recursive least squares (RLS) and complementary filter is proposed. The accuracy of attitude estimation is improved from the aspects of gyro de-noising algorithm and attitude solving principle: in terms of gyro de-noising, in order to overcome the deficiency of traditional recursive least squares, a random weighted recursive least squares method is proposed; in the aspect of attitude calculation, on the basis of the traditional complementary filter, the switching frequency of the filter is adjusted by adaptive proportional-integral (PI) parameter adjustment, and finally the superposition of high pass filtering of gyro integral value and low pass filtering of accelerometer is obtained. The static and dynamic test results of the turntable showed that the proposed method can effectively reduce the noise of gyro and improve the accuracy of attitude estimation.

Key words: micro-electromechanical system; inertial navigation; recursive least squares; complementary filters

Citation: CHEN Guangwu, LI Shaoyuan, LI Wenyuan, et al. Attitude estimation based on recursive least square and complementary filtering. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(7): 1096 – 1103

1 引言

微机电系统(micro-electromechanical system, MEMS)由于其成本低、体积小、易于集成以及功耗低等优点, 近年来成了惯性导航系统的首选器件, 基于

MEMS的惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)能够测量载体运动的三轴角速率信息和加速度信息, 通过姿态解算就能够得到载体姿态, 实现惯性导航. 近年来随着MEMS技术的飞速发展, 其在消费

收稿日期: 2018-05-16; 录用日期: 2018-09-25.

†通信作者. E-mail: cgywjh1976@126.com; Tel.: +86 13893686935.

本文责任编辑: 倪茂林.

国家自然科学基金项目(61863024), 甘肃省基础研究创新群体计划项目(1606RJA327), 甘肃省自然科学基金项目(18JR3RA107), 甘肃省高等学校科研项目(2018C-11), 甘肃省科技计划项目(18CX3ZA004)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61863024), Provincial Basic Research Innovation Group Plan of Gansu (1606RJA-327), Provincial Natural Science Foundation of Gansu (18JR3RA107), Provincial Higher Education Research Fund of Gansu (2018C-11) and Provincial Science and Technology Program of Gansu (18CX3ZA004).

领域以及工业领域得到了广泛应用。

但是基于MEMS的陀螺仪有着不可忽视的偏移误差,这导致了姿态解算的漂移。为解决基于MEMS的姿态漂移问题,目前研究者们主要从两方面进行研究:陀螺去噪和姿态解算方法。在MEMS陀螺去噪方面,文献[1]分析了小波阈值去噪原理和MEMS陀螺数学模型,采用小波阈值去噪对MEMS陀螺信号进行处理,使得陀螺的零偏稳定性得到了改善;文献[2]在小波阈值去噪的基础上提出了基于二代小波变换的阈值去噪方法,并将其引入到陀螺去噪中,以去除MEMS陀螺的随机漂移误差;文献[3]通过对陀螺信号进行自回归(auto regressive, AR)模型处理得到相应的误差参数,然后通过自适应滤波算法对其进行降噪处理,并取得了较好的效果;文献[4]将经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)阈值降噪方法引入到陀螺去噪中,并分析了不同信噪比下的降噪效果。在姿态解算方面;文献[5]为补偿姿态误差问题,将反向传播(back propagation, BP)神经网络引入到姿态解算中对姿态误差进行预测补偿;文献[6]介绍了一种基于卡尔曼滤波的姿态解算方法,并通过加速度计测量重力加速度来纠正姿态漂移。以上去噪方法和姿态解算算法虽然在不同程度上实现了对MEMS陀螺的漂移误差信号的抑制,获得了精度较高的姿态信息,但是仍存在以下问题:第一,算法计算复杂且耗时长,难以满足实时性要求;第二,未考虑周围环境的复杂性。基于以上,本文提出一种基于递推最小二乘(recursive least squares, RLS)与互补滤波器的姿态估计方法。该方法针对传统RLS滤波的不足,提出一种随机加权的递推最小二乘法,利用随机加权实现对偏差的估计,以提高滤波精度;同时在传统互补滤波器的基础上通过自适应调整比例-积分(proportional-integral, PI)参数来调整滤波器的交接频率,最终得到陀螺积分值的高通滤波和加速度计的低通滤波的叠加。

2 姿态四元数原理

设**b**系表示载体坐标系,选取东-北-天导航坐标系为惯性导航坐标系,用**n**表示,则由**b**系到**n**系的坐标变换矩阵(又称方向余弦矩阵)表示为 C_b^n 。由于安装在载体上的惯性测量单元输出的信息是载体坐标系下的数据,而姿态解算后输出的是导航坐标系下的信息,因此在进行姿态更新的时候需要将载体坐标系下的陀螺仪和加速度计的三轴输出信息通过实时计算出

的 C_b^n 转换成导航坐标系下的值,从而进一步完成姿态解算。由于**n**系和**b**系均为直角坐标系,且各轴之间始终保持垂直,因此,两坐标系的空间位置关系即可理解为刚体的定点转动。用四元数描述刚体的定点转动,可表示为^[7]

$$\mathbf{q} = \cos \frac{\theta}{2} + \mathbf{u}^n \sin \frac{\theta}{2}, \quad (1)$$

其中: \mathbf{q} 表示四元数,包含了这种等效旋转的全部信息; \mathbf{u}^n 表示旋转轴和旋转方向; θ 表示转过的角度。用四元数描述从**b**系到**n**系的坐标变换时,可认为**b**系是由**n**系经过无中间过程的一次性等效旋转形成的,用四元数表示**b**系到**n**系的坐标变换矩阵为

$$C_b^n = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 + q_0q_2) & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

将 C_b^n 简记为

$$C_b^n = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

求解坐标变换矩阵的关键在于如何更新姿态四元数,即转换为四元数微分方程的求解,四元数微分方程如下^[8]:

$$\frac{d\mathbf{q}}{dt} = \frac{1}{2}\mathbf{q} \otimes \boldsymbol{\omega}^b = \frac{1}{2}M'(\boldsymbol{\omega}^b)\mathbf{q}, \quad (4)$$

其中

$$M'(\boldsymbol{\omega}^b) = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z \\ \omega_x & 0 & \omega_z & -\omega_y \\ \omega_y & -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_z & \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中: \otimes 表示四元数乘法符号; $\mathbf{q} = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3]$; $\boldsymbol{\omega}^b = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$ 表示载体坐标系下的陀螺仪三轴的角速率输出。

在东-北-天导航坐标系下, ψ, θ, γ 分别表示运动载体的航向角、俯仰角和横滚角,则用欧拉角法表示的**b**系到**n**系的坐标变换矩阵为

$$C_b^n = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \gamma - \sin \psi \sin \theta \sin \gamma & -\sin \psi \cos \theta \cos \psi \sin \gamma + \sin \psi \sin \theta \cos \gamma \\ \sin \psi \cos \gamma + \cos \psi \sin \theta \sin \gamma & \cos \psi \cos \theta \sin \psi \sin \gamma - \cos \psi \sin \theta \cos \gamma \\ -\cos \theta \sin \gamma & \sin \theta \cos \theta \cos \gamma \end{bmatrix}. \quad (6)$$

对比式(3)和式(6)可得姿态角为

$$\begin{cases} \theta = \arcsin(T_{32}), \\ \gamma = \arctan\left(-\frac{T_{32}}{T_{33}}\right), \\ \psi = \arctan\left(\frac{T_{12}}{T_{22}}\right). \end{cases} \quad (7)$$

3 基于互补滤波器的姿态估计

互补滤波器是针对同一个信号的不同传感器测量得到的噪声特性,从频率域分辨和消除噪声.相比于时域的滤波器,并不需要对信号进行精确建模,而且操作简单易实现^[9].本文采用加速度计和陀螺仪构建姿态测量系统,研究互补滤波器估计载体姿态,通过调整控制器参数来设置滤波器运作规则,使得互补滤波器能根据载体的运动状态来自适应调整参数.自适应互补滤波所要解决的问题就是如何根据控制对象的实际运行状态,自适应的调整权重系数从而在复杂环境下更好的完成运动载体的姿态估计^[10].

互补滤波关键有两点:一是选取合适的交接频率,二是设置合适的控制器参数 k_p 和 k_i .本文通过自适应调整 k_p 和 k_i 来调整传感器的交接频率,最终得到陀螺积分值的高通滤波和加速度计的低通滤波的叠加,最佳的姿态估计值.

3.1 互补滤波器

互补滤波器提供了一种融合高通滤波器与低通滤波器的手段,互补滤波姿态估计算法是一种基于四元数原理的算法.对于低成本的IMU,由陀螺仪积分得到的角度随时间的增加积分漂移与温度漂移的误差比较大,因此短时精度好;加速度计测量误差不会随时间积累,长时精度好,但是对载体加速度敏感,无法区分重力加速度和载体运动加速度,取瞬时值计算误差较大.

由文献[10]对IMU的动态响应分析曲线,加速度计动态响应较慢,在高频时信号不可用,可通过低通滤波器抑制高频信号,陀螺仪响应快,但由于零漂等在低频段信号干扰较大,通过高通滤波器可抑制低频噪声.两种传感器的动态响应频率覆盖了整个频率范围,选择合适的交接频率,采用互补滤波器将两种传感器数据融合可提高姿态估计精度.根据上述分析,设计互补滤波观测器原理框图如图1所示,两个传递函数可表示为式(8)和式(9).

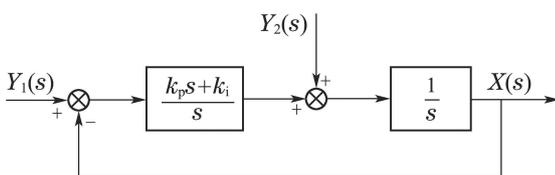


图1 互补滤波观测器框图

Fig. 1 Block diagram complementary filter observer

图1中,两滤波器 $F_1(s)$ 和 $F_2(s)$ 在频域上互补,因此 $F_1(s) + F_2(s) = 1$.

$$F_1(s) = \frac{X(s)}{Y_1(s)} = \frac{k_p s + k_i}{s^2 + k_p s + k_i}, \quad (8)$$

$$F_2(s) = \frac{X(s)}{Y_2(s)} = \frac{s^2}{s^2 + k_p s + k_i}. \quad (9)$$

互补滤波设计的关键在于高、低通滤波器交接频率的确定^[11],交接频率可以通过调节 k_p 和 k_i 两个参数改变,因此对 k_p 与 k_i 的合理设置直接影响系统姿态估计的精度与稳定性.

3.2 自适应互补滤波算法

在实际情况中,载体的运动情况随时变化,不同的运动情况难以适应一组固定的控制参数,因此在载体运动发生变化时,系统姿态估计结果很容易出现较大偏差甚至出现估计结果发散的现象.因此,本文提出一种自适应调节PI参数的方法,假设 k_i 不变,在载体运动过程中根据加速度计与陀螺仪的输出值实时动态的调整 k_p 的值,本文将载体的运动情况可分为3种:静止或匀速状态、低加速状态、高加速状态.它们分别对应于不同的PI参数,使得互补滤波器始终得到较好的姿态估计的结果.自适应互补滤波姿态估计算法框图如图2所示.

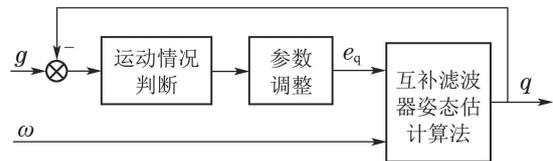


图2 自适应互补滤波器框图

Fig. 2 Block diagram of adaptive complementary filter

图2中,在每次进行姿态估计时,首先根据加速度计的输出对载体的运动情况进行判断,根据判断的运动情况相应调整PI参数,然后在进行互补数据融合,最后根据四元数姿态更新方程计算出此刻姿态.

由文献[10]中对两惯性传感器的动态分析可知,加速度计在低频范围时表现了较好的动态响应,当频率超过2.35 rad/s时出现偏离现象,而陀螺仪高频特性较好,在频率超过3.48 rad/s时表现出较好的动态响应特性.本文对载体运动情况的判断主要采用的是加速度计的输出信息,系统的初始交接频率可设置为 $\omega_{am} = 2.35$ rad/s.

本文设置低加速状态的阈值 h 为0.3 g.用以判断运动情况的为载体的合加速度,计算公式为

$$\alpha = |\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} - g|, \quad (10)$$

其中: a_x, a_y, a_z 为加速度计的输出, g 为当地重力加速度值.

$$\beta = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2, \quad (11)$$

其中 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 为加速度计白噪声零偏的标准差。

本文的自适应互补滤波规则如下:

1) 当 $\alpha \leq \beta$ 时,表明载体处于静止或匀速运动状态, k_p 取较大值, $k_p = 0.707\omega_{am}$.

2) 当 $\beta < \alpha \leq h$ 时,表明载体处于低加速运动状态, k_p 应当适当减小, $k_p = 0.707\omega_{am}(1 - \frac{3}{10\alpha})$.

3) 当 $\alpha > h$,表明载体处于高加速状态,加速度计的值无法用于补偿姿态估计误差,此时, $k_p = 0$.

4 基于RLS的陀螺去噪方法

在姿态估计方面制约其精度的另一方面就是陀螺噪声,作为敏感传感器器件,陀螺仪对周围环境、电磁干扰及载体震动都表现出一定的噪声特性.为了进一步减少这种噪声对陀螺的影响,考虑实时性及对环境的适应性,本章在传统RLS滤波算法的基础上,结合随机加权法提出一种新的随机加权RLS滤波算法.

4.1 RLS算法

递推最小二乘法是在最小二乘法的基础上,考虑计算机存储问题的情况下提出的. RLS估计从每次获得的测量值中提取出被估计的信息,用于修正上一步所得的估计,量测次数越多,修正次数越多,估计精度也就越高,与LS相比RLS不需要存储大量的量测数据^[12].

其求取准则是指数加权的误差平方和达到最小^[13].

$$\xi(n) = \sum_{i=1}^n \lambda^{n-i} |e(i)|^2. \quad (12)$$

引入遗忘因子 λ 的作用是离 n 时刻近的误差赋较大权重,离 n 时刻远的误差赋较小权重,确保在过去一段时间的观测数据被“遗忘”,从而使滤波器工作在平稳状态下.

RLS的具体实现步骤如下:

步骤 1 滤波输出:

$$y(n) = w^T(n-1)x(n). \quad (13)$$

步骤 2 增益计算:

$$k(n) = \frac{p(n-1)x(n)}{\lambda + x^T(n)p(n-1)x(n)}. \quad (14)$$

步骤 3 估计误差:

$$e(n) = d(n) - w^T(n-1)x(n). \quad (15)$$

步骤 4 权重系数更新:

$$w(n) = w(n-1) + k(n)e(n). \quad (16)$$

步骤 5 协方差更新:

$$p(n) = \lambda^{-1}(p(n-1) - k(n)w(n)p(n-1)), \quad (17)$$

其中: $d(n)$ 表示输入的离散量测信号; $y(n)$ 表示滤波后的输出; $x(n)$ 为RLS估计值.一般给定了初值 $x(0)$, $p(0)$ 便可开始进行最小二乘递推运算.根据式(13)–(17)可绘制出RLS算法的信号流程图如图3所示.

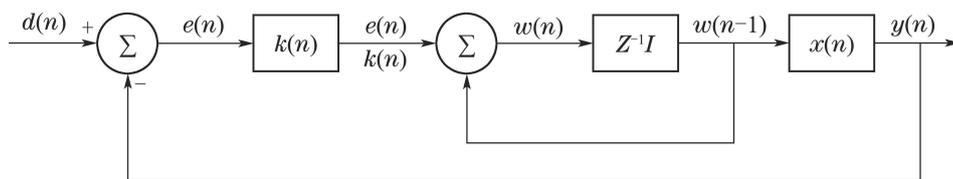


图3 RLS算法信号流程图

Fig. 3 RLS algorithm signal flow diagram

4.2 随机加权RLS算法

随机加权估计是郑忠国教授在研究Bootstrap方法基础上,提出的一种新的统计计算方法^[14].该方法直接利用样本数据,通过给观测数据加适当的权值来形成新样本,以此来逼近总体分布.这种方法与Bootstrap方法是平行的,且具有很多优点,如易于计算,在小子样情况下具有更高的逼近精度等^[15].

设 X_1, X_2, \dots, X_n 是来自分布函数 $F(x)$ 的独立同分布样本经验分布函数为

$$F(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{(X_i \leq x)}, \quad (18)$$

则 $F(x)$ 的随机加权估计为

$$H_n(x) = \sum_{i=1}^n v_i I(X_i \leq x), \quad (19)$$

其中 $I(X_i \leq x)$ 是示性函数,即

$$I(X_i \leq x) = \begin{cases} 1, & X_i \leq x, \\ 0, & X_i > x, \end{cases}$$

向量 (v_1, v_2, \dots, v_n) 服从Dirichlet $D(1, \dots, 1)$ 分布,且满足 $\sum_{i=1}^n v_i = 1$, (v_1, v_2, \dots, v_n) 的分布密度 $f(v_1, v_2, \dots, v_{n-1}) = \Gamma(n)$.

本文在RLS的基础上提出一种随机加权估计的RLS陀螺去噪算法,在原有RLS误差计算的基础上,通过采用随机加权估计对误差进行随机加权拟合,进一

步提高RLS的滤波精度. 假设选取移动窗口为 N , 在 n 时刻有 N 个数据, 根据RLS误差公式(15)可得在移动窗口中误差数据的平均值为

$$\hat{e}(n) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d(i) - w^T(i-1)x(i)). \quad (20)$$

根据随机加权公式(19), 可得到式(20)的随机加权估计为

$$\hat{e}^*(n) = \sum_{i=1}^N v_i(d(i) - w^T(i-1)x(i)). \quad (21)$$

5 实验与验证

为验证本文所提出的方法的有效性, 通过转台设计了静态和摇摆实验. 本实验采用的双轴转台如图4所示, 其中包含了主轴和俯仰轴, 主轴用来控制系统的横滚角转动, 俯仰轴用来控制系统的俯仰角转动, 系统所采集到的数据通过RS232将数据传输到电脑终端.

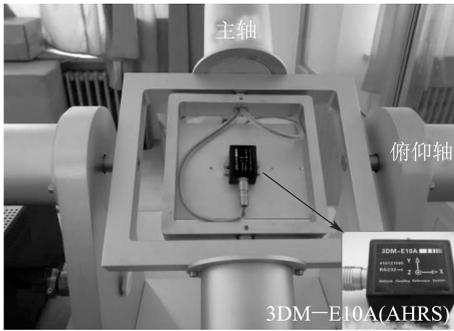


图4 双轴转台实物图

Fig. 4 Physical map of biaxial rotary table

该转台中所使用的传感器为3DM-E10A(AHRS), 其中输出信息包含了三轴陀螺仪和三轴加速度计的原始测量信息. 同时为了说明本文所提出的姿态估计方法的精度, 该传感器可作为航姿参考系统(attitude and heading reference system, AHRS) 输出相对准确的姿态信息(实验数据的参考值), 因此可用本文所提出的方法的计算值和系统输出的姿态信息进行对比分析. 该传感器的具体性能参数如表1所示.

表1 3DM-E10A性能参数

Table 1 3DM-E10A performance parameters

性能指标	参数
陀螺零偏稳定性	0.03 (°)/s
加速度计零偏稳定性	0.03 g
静态角度误差	±0.1°
动态角度误差	±1.0°

5.1 静态测试

为验证在静态情况下本方法的性能, 实验分两部分进行验证, 首先是验证MEMS陀螺去噪效果. 将转

台开机置水平后预热2个小时, 之后开始采集数据, 数据输出频率20 Hz, 采集时间为430 s. 设置对比方法为: 原始测量数据、RLS以及本文提出的随机加权RLS. 其 x, y, z 三轴的陀螺数据处理结果如图5所示.

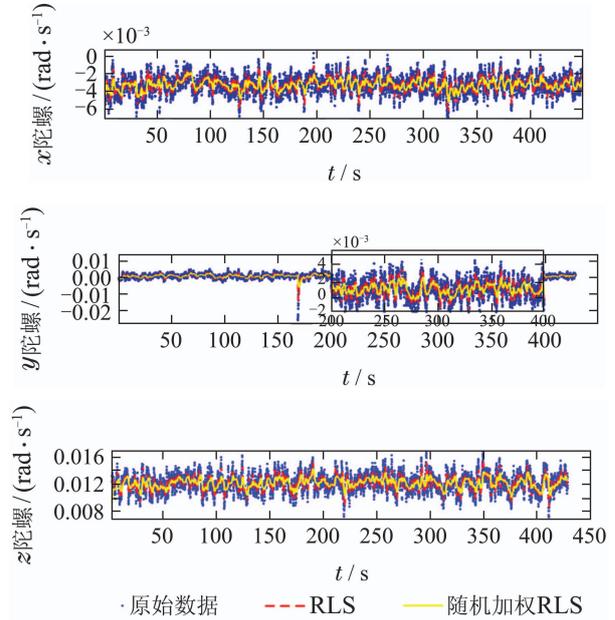


图5 静态陀螺去噪曲线图

Fig. 5 Static gyro denoising curve

图5中: 蓝色线表示原始MEMS陀螺数据; 红色线表示经过RLS处理后的陀螺数据; 黄色线表示用随机加权RLS处理后的陀螺数据. 从图中可以看出, 本文提出的方法与RLS相比有较好的性能. 为进一步说明数据的科学性, 引入均方根误差RMSE对数据进一步处理, 均方根误差是观测值与真值的偏差平方和与观测次数 N 的比值的平方根, 能够很好地衡量观测值的偏差, 其如式(22)所示:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (x(t) - \bar{x}(t))^2}. \quad (22)$$

利用式(22)对图5中3种方法的结果进行分析处理, 得到表2中的不同方法下的均方根误差结果. 从表2中可以看出随机加权RLS较RLS相比有着良好的性能.

表2 陀螺均方根误差RMSE(rad/s)

Table 2 Gyro root mean square error RMSE (rad/s)

陀螺	原始数据	RLS	随机加权RLS
x	0.00106	0.00083	0.00057
y	0.00153	0.00118	0.00081
z	0.00132	0.00103	0.00070

其次, 验证在静态情况下提出的姿态估计方法的效果. 在不同方法下姿态解算结果如图6所示.

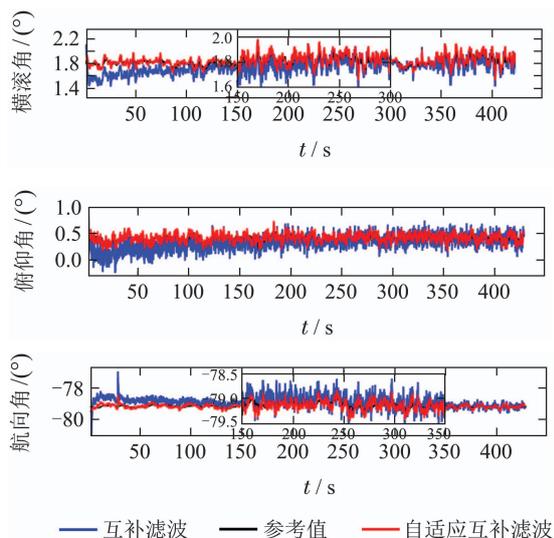


图6 姿态估计曲线

Fig. 6 Attitude estimation curve

图6中: 蓝线表示采用互补滤波算法解算的结果; 黑线表示航姿参考系统输出的标准姿态信息(参考值); 红线表示自适应互补滤波的解算结果. 图6分别显示了姿态的横滚角、俯仰角和航向角. 从图中看出本文提出的方法的解算结果的波动性要小于传统的互补滤波算法, 为进一步说明不同方法下姿态解算的误差情况, 将其两种方法分别同参考值做对比绘制出如图7所示的姿态误差曲线. 从图7中可以看出一开始自适应互补滤波就有着很好的收敛性, 而传统的互补滤波则收敛速度较慢.

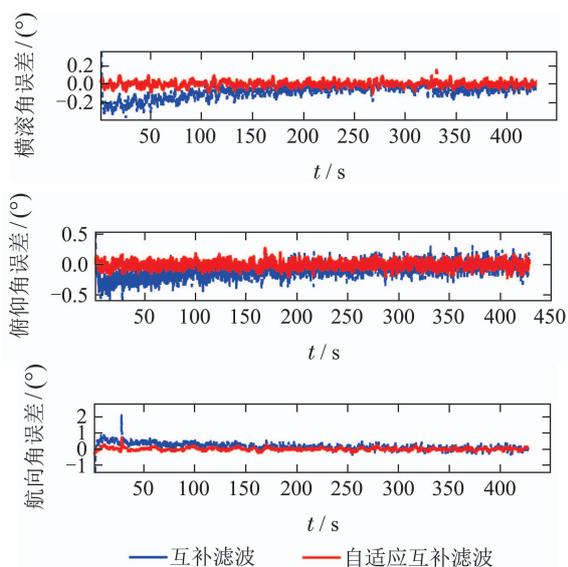


图7 姿态估计误差曲线

Fig. 7 Pose estimation error curve

表3是根据图7中的误差数据进行求平均值处理, 从结果中可以看出, 与传统的互补滤波相比采用自适应互补滤波在横滚角、俯仰角以及航向角精度方面都有所提高.

表3 姿态角误差均值(°)

Table 3 Attitude angle error mean (°)

方位角	互补滤波	自适应互补滤波
横滚角	-0.17272	0.003202
俯仰角	-0.20911	-0.00209
航向角	0.399699	0.020041

5.2 摇摆测试

为验证本文所提出的方法在动态姿态解算方面的性能, 本章节设计了基于转台的摇摆实验. 设置转台的摇摆幅度为 20° , 摇摆速度为 $5^\circ/\text{s}$, 摇摆轴为转轴. 首先分析动态摇摆情况下的陀螺去噪效果.

图8给出了3种方法下的陀螺去噪曲线, 从图中看出代表随机加权RLS的黄色线的波动性最小, 去噪效果最好.

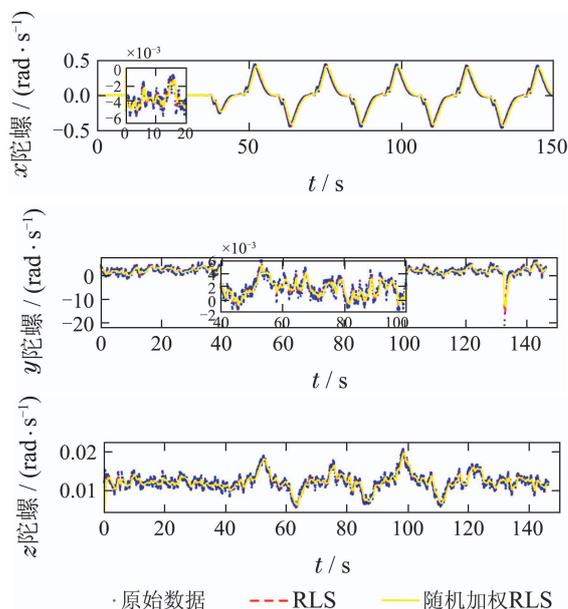


图8 动态陀螺去噪曲线图

Fig. 8 Dynamic gyro denoising graph

表4给出了上述结果的均方根误差值, 在动态情况下随机加权RLS的去噪精度相比RLS在 x, y, z 三轴方向均有不同程度的提高.

表4 陀螺均方根误差RMSE(rad/s)

Table 4 Gyro root mean square error RMSE (rad/s)

陀螺	原始数据	RLS	随机加权RLS
x	0.15818	0.15697	0.15533
y	0.00208	0.00181	0.00168
z	0.00223	0.00211	0.00205

在动态姿态估计方面, 图9给出了摇摆情况下不同方法的姿态估计结果. 图10给出了相应的姿态误差曲线, 从图10中可以看出针对摇摆的横滚角在摇摆部分自适应互补滤波的误差远远小于传统的互补滤波算

法,在动态情况下其收敛性也远远好于传统的互补滤波算法.

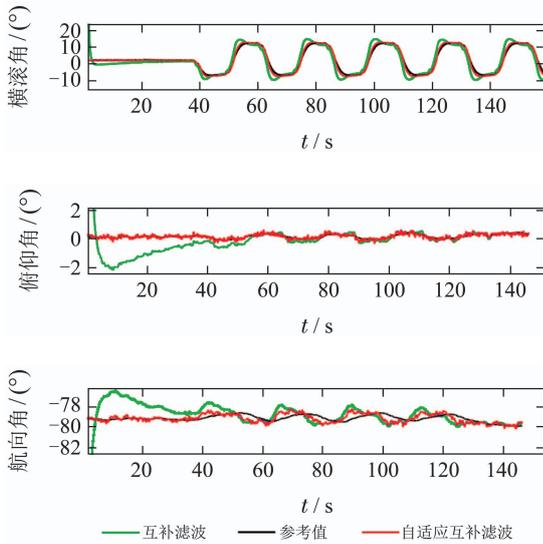


图9 动态姿态估计曲线图

Fig. 9 Dynamic attitude estimation curve

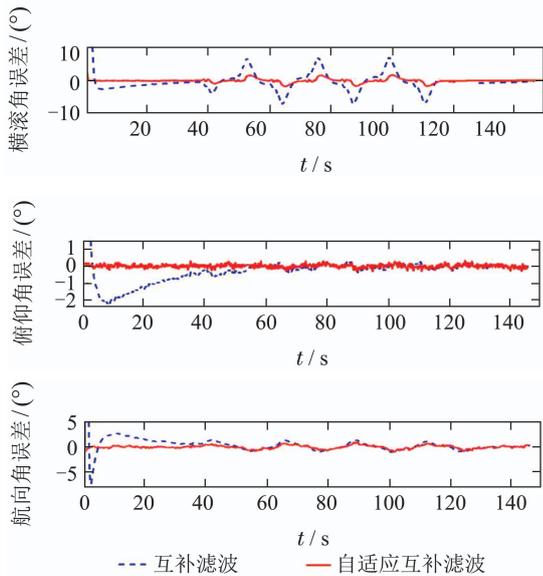


图10 动态姿态估计误差曲线图

Fig. 10 Dynamic pose estimation error graph

表5给出了姿态角误差的均值数据,从表中看出本文提出的自适应互补滤波算法相比传统的互补滤波算法其横滚角、俯仰角以及航向角姿态误差减少了70.5%,99.5%,98.9%.

表5 姿态角误差均值(°)

Table 5 Attitude angle error mean (°)

方位角	互补滤波	自适应互补滤波
横滚角	-0.41461	-0.12204
俯仰角	-0.35880	-0.00096
航向角	0.36638	0.00365

6 结论

为提高基于MEMS的姿态估计精度,本文从两个方面入手:第一,在陀螺去噪方面,为克服传统递推最小二乘法的不足,提出一种随机加权的递推最小二乘法,利用随机加权实现对偏差的估计,以提高滤波精度;第二,在姿态解算方面,在传统互补滤波器的基础上通过自适应调整PI参数来调整传感器的交接频率,最终得到陀螺积分值的高通滤波和加速度计的低通滤波的叠加.并通过半实物仿真验证了该方法的有效性.

参考文献:

- [1] SONG L, QIN Y, YANG P. Application of wavelet threshold denoising on MEMS gyro. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2009, 23(1): 33 – 36.
- [2] MAO B, WEI W J, TONG W J, et al. MEMS gyro denoising based on second generation wavelet transform. *First International Conference on Pervasive Computing Signal Processing and Applications*. Harbin: IEEE, 2010: 255 – 258.
- [3] SUN J, XU X, LIU Y, et al. FOG random drift signal denoising based on the improved AR model and modified Sage-Husa adaptive Kalman filter. *Sensors*, 2016, 16(7): 1073 – 1095.
- [4] YANG G, LIU Y, WANG Y, et al. EMD interval thresholding denoising based on similarity measure to select relevant modes. *Signal Processing*, 2015, 109(C): 95 – 109.
- [5] AHMED H, TAHIR M. Accurate attitude estimation of a moving land vehicle using low-cost MEMS IMU sensors. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, 18(7): 1723 – 1739.
- [6] SHENG H, ZHANG T. MEMS-based low-cost strap-down AHRS research. *Measurement*, 2015, 59: 63 – 72. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2014.09.041>.
- [7] ZHANG Dexian, NIE Guigen. Adaptive attitude quaternion Kalman filter based on factored quaternions. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(3): 367 – 374. (张德先, 聂桂根. 基于分解四元数的自适应姿态四元数卡尔曼滤波. *控制理论与应用*, 2018, 35(3): 367 – 374.)
- [8] HAN Zhiguo, ZHANG Ke, LÜ Meibai, et al. Adaptive non-singular fast terminal sliding mode based tolerant control for spacecraft. *Control Theory & Applications*, 2016, 33(8): 1046 – 1053. (韩治国, 张科, 吕梅柏, 等. 航天器自适应快速非奇异终端滑模容错控制. *控制理论与应用*, 2016, 33(8): 1046 – 1053.)
- [9] SHEN Xiaowei, YAO Minli, ZHAO Peng. Antenna attitude estimation based on complementary filter for mobile satellite communication. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2011, 19(2): 194 – 197. (沈晓卫, 姚敏立, 赵鹏. 基于互补滤波的动中通天线姿态估计. *中国惯性技术学报*, 2011, 19(2): 194 – 197.)
- [10] LAN Jianjun, LI Jialu, LIU Ying, et al. Control of wheeled inverted pendulum based on adaptive complementary filter algorithm. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2014, (6): 66 – 68. DOI: 10.13462/j.cnki.mmtamt.2014.06.018. (兰建军, 李佳璐, 刘颖, 等. 基于自适应互补滤波算法的轮式倒立摆控制. *组合机床与自动化加工技术*, 2014, (6): 66 – 68. DOI: 10.13462/j.cnki.mmtamt.2014.06.018.)
- [11] WANG Li, ZHANG Zheng, SUN Ping. An adaptive complementary filter for attitude estimation. *Control Engineering of China*, 2015, 22(5): 881 – 886.

- (王立, 章政, 孙平. 一种自适应互补滤波姿态估计算法. *控制工程*, 2015, 22(5): 881 – 886.)
- [12] LI Yinguo, TANG Zhuoqun, HUANG Lei. Recursive least-squares and minimum-norm algorithm for system identification without persistent excitation condition. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(4): 365 – 370.
(李银国, 汤卓群, 黄镭. 非持续激励条件下系统辨识递推最小二乘最小范数算法. *控制理论与应用*, 2009, 26(4): 365 – 370.)
- [13] ELISEI-ILIESCU C, STANCIU C, PALEOLOGU C, et al. Robust variable-regularized RLS algorithms. *Hands-free Speech Communications and Microphone Arrays*. San Francisco: IEEE, 2017: 171 – 175.
- [14] ZHENG Zhongguo. Random weighting method. *Acta Mathematicae Applicatae Sinica*, 1987, 10(2): 247 – 253.
(郑志国. 随机加权法. *应用数学学报*, 1987, 10(2): 247 – 253.)
- [15] MARTINEK R, KAHANKOVA R, NAZERAN H, et al. Non-invasive fetal monitoring: a maternal surface ECG electrode placement-based novel approach for optimization of adaptive filter control parameters using the LMS and RLS algorithms. *Sensors*, 2017, 17(5): 1154 – 1185.

作者简介:

陈光武 教授, 目前研究方向为交通信息工程及控制, E-mail: cgwyjh1976@126.com;

李少远 教授, 目前研究方向为分布式预测控制、网络控制、动态系统优化, E-mail: syli@sjtu.edu.cn;

李文元 硕士研究生, 目前研究方向为控制理论与控制工程, E-mail: liweny1994@163.com;

王迪 硕士研究生, 目前研究方向为控制理论与控制工程, E-mail: wangdigood2011@163.com;

张琳婧 硕士研究生, 目前研究方向为控制理论与控制工程, E-mail: 0217673@stu.lzjtu.edu.cn.