

基于动态权值共轭梯度的自适应互补滤波姿态估计算法^①

付 雷^② 章 政^③ 余 义

(武汉科技大学机器人与智能系统研究院 武汉 430081)

(武汉科技大学信息科学与工程学院 武汉 430081)

摘 要 针对低成本微机电系统(MEMS)惯性测量器件易发散,单一的姿态估计算法存在精度低、抗干扰性弱等问题,提出了一种动态权值共轭梯度法与自适应互补滤波融合的姿态估计算法。该算法在共轭梯度算法中加入动态权值,根据载体运动加速度大小对权值进行动态调整,消除运动加速度对姿态估计的不利影响;将加速度计的输出采用动态权值共轭梯度法估计出姿态四元数,并将其与陀螺仪的输出通过自适应互补滤波算法融合以减小惯性测量单元(IMU)的漂移和噪声干扰,提高微型四旋翼飞行器姿态估计的跟踪精度。为了验证所设计算法的可行性和有效性,搭建了基于 STM32 单片机的四旋翼飞行器实验平台,实验结果表明该算法提高了姿态估计的跟踪精度以及非重力运动加速度干扰下的抗干扰能力。

关键词 姿态估计; 共轭梯度法; 互补滤波; 四旋翼飞行器; 微机电系统(MEMS)

0 引 言

微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)因体积小、重量轻、成本低等优点被广泛应用于微型飞行器的姿态测量。然而单一的 MEMS 传感器存在缺陷,难以完成高精度的姿态测量,例如 MEMS 角速率陀螺仪存在零点漂移和随机误差, MEMS 加速度计在动态姿态测量时易受到高频噪声和运动加速度的影响,姿态估计的精度较差^[1]。因此实现多传感器融合以及设计稳定快捷的姿态估计算法是获取高精度飞行器姿态信息的有效途径之一。

针对 MEMS 中惯性器件可信度不高和单一姿态估计算法精度低等问题,许多学者在多传感器融合的姿态估计算法上展开了大量研究,目前常用的

姿态估计算法有:互补滤波(complementary filter, CF)、梯度下降法(gradient descent, GD)、卡尔曼滤波(Kalman filter, KF)等。文献[2]提出了一种显性互补滤波算法,在互补滤波算法的补偿环节加入了积分器,直接对惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)所测的矢量数据进行融合。在此基础上,文献[3]提出了一种自适应互补滤波算法,依据陀螺仪测得的角速度实时调节 PI 控制器补偿系数,提高了姿态估计精度。文献[4]提出了一种互补与自适应限幅组合滤波的姿态估计算法,减小了运动加速度的影响,提高了非匀速运动下姿态估计精度。文献[5]提出了一种基于梯度下降法的姿态融合算法,利用梯度下降法求解出目标函数误差方程姿态四元数与微分方程求解出的姿态四元数进行融合,得到最优姿态。文献[6]提出了一种定步长梯度下降姿态估计方法,实验证明其姿态估计性能

① 国家自然科学基金(61773298),冶金自动化与检测技术教育部工程研究中心开放基金(MADT201603),武汉科技大学研究生创新创业基金重点资助项目(JCX2016018)和 2017 年度武汉科技大学国防预研基金(GF201706)资助项目。

② 男,1994 年生,硕士生;研究方向:四旋翼飞行器姿态估计、导航控制;E-mail: 764682406@qq.com

③ 通信作者,E-mail: 764682406@qq.com

(收稿日期:2018-12-03)

不亚于卡尔曼滤波,但收敛速度较慢。文献[7]提出一种基于共轭梯度法和互补滤波相结合的姿态估计方法,算法的收敛速度高于梯度下降法,且避免了牛顿法计算量大的缺点。文献[8]设计了一种自适应调节梯度下降法参数的方法,能够较好地滤除运动加速度,减少运动加速度对姿态估计的影响。文献[9-11]提出基于扩展卡尔曼滤波的相关算法,扩展卡尔曼滤波是应用最为广泛的一种非线性系统滤波方法,但其存在非线性化误差。文献[12]提出一种结合动态步长梯度下降法的改进型扩展卡尔曼滤波算法,该算法克服了测量方差线性化误差,减小了计算量。但卡尔曼滤波及各种改进型的卡尔曼滤波由于涉及系统噪声序列方差矩阵和测量噪声序列方差矩阵的选择增大了计算量,不适合低成本嵌入式平台。

本文设计了一种基于动态权值共轭梯度法与互补滤波结合的姿态估计算法。首先,将加速度计的输出通过共轭梯度法进行寻优估计以克服梯度下降法收敛慢的缺点,在共轭梯度算法中加入动态权值,根据载体运动加速度的大小改变权值以减小运动加速度对姿态估计的影响。然后,将其和陀螺仪数据通过自适应互补滤波融合,在低速运动下增大补偿

系数的值以减小陀螺仪的误差,在高速运动下减小补偿系数的值以减小加速度计的误差,利用两者在不同运动状态下的不同特性来提高姿态估计的精度。最后,本文搭建了基于低成本的 STM32 处理器的四旋翼飞行器实验测试平台,将本文所设计的算法进行静态实验和动态实验,验证了所设计算法的有效性。

1 基于动态权值共轭梯度的自适应互补滤波姿态估计算法

为了提高姿态估计的精度,减小运动加速度对姿态估计的干扰,本文提出了基于动态权值共轭梯度的自适应互补滤波姿态估计算法,结构如图 1 所示。首先将加速度计数据通过动态权值的共轭梯度法进行寻优估计,得到加速度计数据估计的姿态四元数,然后通过四元数旋转矩阵求出重力在载体坐标系下的表示,并与加速度计的测量值作差得到四元数误差向量,最后将误差向量与陀螺仪数据通过自适应互补滤波算法进行融合得到更新后的四元数进而得到姿态角。

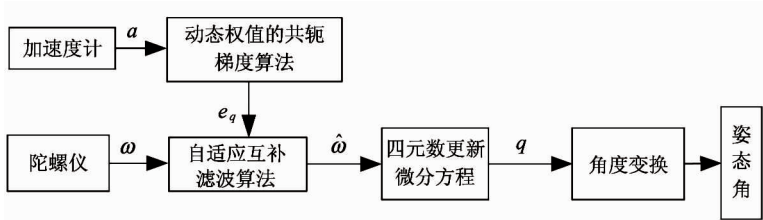


图 1 基于动态权值共轭梯度的自适应互补滤波姿态估计算法结构图

1.1 坐标系描述

导航坐标系(n系)和载体坐标系(b系)的角度转换关系如图 2 所示。其中导航坐标系采用东北天(ENU)坐标系,载体坐标系是固连在运载体的坐标系,通常将陀螺仪和加速度计测量的数据定义到载体坐标系上。导航坐标系的坐标原点 O 位于运载体质心,载体坐标系原点 O' 与导航坐标系原点 O 重合,载体绕导航坐标系的 X_n 、 Y_n 、 Z_n 轴旋转分别为俯仰角(pitch)、翻滚角(roll)、偏航角(yaw)。

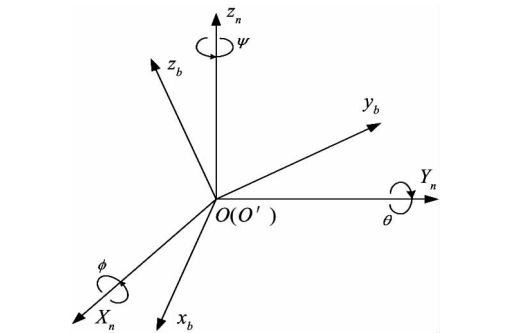


图 2 载体坐标系和导航坐标系的角度转换关系

1.2 动态权值共轭梯度姿态估计算法

对于加速度计更新姿态四元数在静态测量时精度较高而动态测量时会受到运动加速度影响,为了减小运动加速度对姿态估计的干扰,加入动态加权系数 α 。将重力加速度在载体坐标系的输出与加速度计在载体坐标系下测量的数据相减可以得到测量误差的四元数函数矩阵,用共轭梯度法对测量误差四元数函数矩阵求解最小值可得到姿态四元数的最优估计。

假设加速度计在载体坐标系中的输出为 ${}^b\mathbf{a} = [{}^b a_x \ {}^b a_y \ {}^b a_z]^T$,将 ${}^b\mathbf{a}$ 进行归一化可得 ${}^b\hat{\mathbf{a}} = \frac{{}^b\mathbf{a}}{|{}^b\mathbf{a}|} = [{}^b a_x \ {}^b a_y \ {}^b a_z]^T$,重力加速度向量在导航坐标系下可表示为 ${}^n\mathbf{g} = [0 \ 0 \ 1]^T$,从导航坐标系到载体坐标系的转移矩阵可表示为

$${}^b_n\mathbf{C} = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 + q_0q_3) & 2(q_1q_3 - q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 - q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 + q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 + q_0q_2) & 2(q_2q_3 - q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

重力加速度向量 ${}^n\mathbf{g}$ 在载体坐标系下的投影为

$${}^b\mathbf{g} = {}^b_n\mathbf{C}^n\mathbf{g} = \begin{bmatrix} 2(q_1q_3 - q_0q_2) \\ 2(q_2q_3 + q_0q_1) \\ q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

将式(2)中所得的数据与归一化后的加速度计测量的数据相减可得到测量误差为

$$\mathbf{e}({}^b_n\mathbf{q}, {}^b\mathbf{a}) = {}^b\mathbf{g} - {}^b\hat{\mathbf{a}} = \begin{bmatrix} 2(q_1q_3 - q_0q_2) - {}^b\hat{a}_x \\ 2(q_2q_3 + q_0q_1) - {}^b\hat{a}_y \\ q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 - {}^b\hat{a}_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

四元数的误差函数最优问题可转换为 $\mathbf{f}({}^b_n\mathbf{q}, {}^b\mathbf{a}) = \mathbf{e}({}^b_n\mathbf{q}, {}^b\mathbf{a})^T \mathbf{e}({}^b_n\mathbf{q}, {}^b\mathbf{a})$ 求最小值问题。

共轭梯度法通过式(4)更新载体姿态的四元数:

$$\mathbf{Q}_a(k+1) = \mathbf{Q}_a(k) + \alpha \lambda_k \mathbf{d}_k \quad (4)$$

其中 $\mathbf{Q}_a(k)$ 为姿态四元数, λ_k 为搜索步长, $\mathbf{d}_k$ 为搜索方向。

$$\begin{cases} \lambda_k = -\frac{\mathbf{g}_k^T \mathbf{d}_k}{\mathbf{d}_k^T \mathbf{d}_k} \\ \mathbf{d}_k = -\mathbf{g}_k + \beta_k \mathbf{d}_{k-1} \end{cases} \quad (5)$$

式中 $\beta_k = \frac{\|\mathbf{g}_k\|^2}{\|\mathbf{g}_{k-1}\|^2}$, $\mathbf{g}_k = \nabla \mathbf{f}_k$, $\mathbf{d}_1 = -\mathbf{g}_1$, $\nabla \mathbf{f}_k = \mathbf{J}^T({}^b_n\mathbf{q}) \times \mathbf{e}({}^b_n\mathbf{q}, \mathbf{a})$, $\mathbf{J}^T({}^b_n\mathbf{q})$ 为 $\mathbf{e}({}^b_n\mathbf{q}, \mathbf{a})$ 的雅克比矩阵,按照式(5)求解,每更新一个新的姿态需要迭代数次得到最优解。为了与陀螺仪进行互补滤波时数据更新保持同步,每次采样只迭代一次。

$$\mathbf{J}({}^b_n\mathbf{q}) = \frac{d\mathbf{f}_k}{d{}^b_n\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{e}_x}{\partial {}^b_n\mathbf{q}} \\ \frac{\partial \mathbf{e}_y}{\partial {}^b_n\mathbf{q}} \\ \frac{\partial \mathbf{e}_z}{\partial {}^b_n\mathbf{q}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2q_2 & 2q_3 & -2q_0 & 2q_1 \\ 2q_1 & 2q_0 & 2q_3 & 2q_2 \\ 2q_0 & 2q_1 & -2q_2 & 2q_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

动态加权系数 α 可表示为加速度计估计值的可信度。当系统处于静止或低加速运动状态时,加速度计的测量值较准确所以可信度较高。但是当系统在高加速度运动状态下,加速度计因无法区分重力加速度和运动加速度从而影响了姿态测量的准确性。所以在这种情况下,加速度计的可信度低,因此应当减小 α 的值甚至取值为零。 α 的确定如下所述:

(1)当 $\|\boldsymbol{\varepsilon}\| \leq \delta$ 时,表明载体处于静止或匀速运动状态,此时 $\alpha = 1$ 。其中 δ 为 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 的静态误差,设定为 0.003 g 。

(2)当 $\delta \leq \|\boldsymbol{\varepsilon}\| \leq \beta$ 时,载体处于低加速运动状态。此时 $\alpha = 1 - \frac{\|\boldsymbol{\varepsilon}\|}{\beta}$ 。其中阈值 β 设定为 0.3 g 。

(3)当 $\|\boldsymbol{\varepsilon}\| \geq \beta$ 时,载体处于高加速运动状态,此时 $\alpha = 0$ 。

运动加速度估计算法原理图如图3所示,在采样时间 Δt 内陀螺仪的积分误差可以忽略不计,因此可直接用陀螺仪的输出更新姿态四元数 $\mathbf{Q}_\omega$ 。该四元数表示的姿态转移矩阵为 ${}^b_n\mathbf{C}_\omega$ 。对于加速度计的输出值需要进行单位换算,假设加速度计测量得到的重力加速度在X、Y、Z轴的输出值分别为 a_{xg} 、 a_{yg} 、 a_{zg} ,则加速度计的单位换算公式为:

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} a_x \cdot (g/a_{xg}) \\ a_y \cdot (g/a_{yg}) \\ a_z \cdot (g/a_{zg}) \end{bmatrix} \quad (7)$$

则加速度计的运动加速度值可通过式(7)进行估算。

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{a} - {}^b_n\mathbf{C}_\omega {}^n\mathbf{g} \quad (8)$$

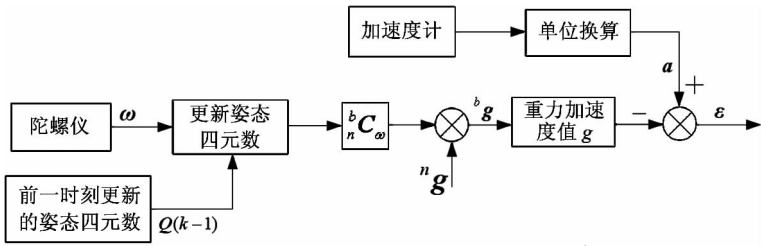


图3 运动加速度估计算法原理图

1.3 自适应互补滤波姿态估计算法

由于受到高频干扰和运动加速度的影响,应用共轭梯度法也难以得到最优估计。因此需要对2种传感器进行数据融合以得到姿态的最优估计。利用陀螺仪和加速度计在频率上互补的特性,采用互补滤波法对这2种传感器数据进行融合可以提高姿态估计的精度。

以 $\hat{\theta}$ 表示互补滤波计算输出的姿态角估计, $\hat{\theta}_a$ 表示加速度计得到的姿态角估计, $\hat{\theta}_g$ 表示陀螺仪得到的姿态角估计。取 $G_L(s) = \frac{C(s)}{s + C(s)}$, $G_H(s) = 1 - G_L(s) = \frac{s}{s + C(s)}$ 。其中 $C(s)$ 具有全通特性,

$G_L(s)$ 具有低通滤波特性, $G_H(s)$ 具有高通滤波特性。则互补滤波融合估计值可表示为

$$\hat{\theta}(s) = G_L(s)\theta_a(s) + G_H(s)\theta_g(s) \quad (9)$$

将式(9)化简可得:

$$s\hat{\theta}(s) = C(s)(\theta_a(s) - \hat{\theta}(s)) + s\theta_g(s) \quad (10)$$

$C(s)$ 如果取固定常数 k_p ,则高通滤波器和低通滤波器的截止频率为 $f_p = k_p/2\pi$,在频率高于 f_p 的高频段,陀螺仪在姿态估计中起主要作用;在频率低于 f_p 的低频段,加速度计在姿态估计中起主要作用。对式(10)进行拉普拉斯反变换可得到其时域上的表达式:

$$\dot{\hat{\theta}} = k_p(\hat{\theta}_a - \hat{\theta}) + \omega \quad (11)$$

其中 ω 为陀螺仪输出的角速率。为了消除陀螺仪的静态偏差,取 $C(s) = k_p + k_i/s$,其中 k_i 决定消除

静态偏差的时间。

考虑到陀螺仪在载体低速转动时误差较大而加速度计在载体高速转动时输出有较大时滞,因此需要采用自适应 k_p 参数对误差进行调整, k_i 为定值。 k_p 的计算公式如下:

$$k_p = \begin{cases} k_{pmax} & 0 \leq \|\omega\| \leq \omega_c \\ k_{pmax} - \frac{k_{pmax} - k_{pmin}}{\omega_{max} - 2\omega_c}(\omega - \omega_c) & \omega_c < \|\omega\| \leq \omega_{max} - \omega_c \\ k_{pmin} & \omega_{max} - \omega_c < \|\omega\| \leq \omega_{max} \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中 ω_{max} 为陀螺仪的最大量程, ω_c 为陀螺仪角速度频率响应的截止角速度($\omega_c < \omega_{max}$), k_{pmax} 、 k_{pmin} 分别为最大截止频率和最小截止频率。根据陀螺仪的截止角速度 ω_c 将载体的转动速度分为3个区域。在低速区域采用最大截止频率 k_{pmax} 从而减小陀螺仪的误差;在中速区域采用可变截止频率 k_p ,且 k_p 的值随着角速度的增大而线性减小即减小截止频率以减小加速度计的误差;在高速区域采用最小截止频率 k_{pmin} 以减小加速度计在高速转动状态下产生的误差。

2 动态权值共轭梯度与自适应互补滤波融合姿态估计

本文姿态估计过程如图4所示。通过动态权值

共轭梯度法估计出的姿态四元数可得到由加速度计更新的姿态转移矩阵 ${}^b_n C_a$ 。重力加速度向量 ${}^n g$ 在其更新的载体坐标系下的投影为

$${}^b \hat{g}_a = {}^b_n C_a {}^n g \quad (13)$$

将式(13)中 ${}^b \hat{g}_a$ 与式(2)中 ${}^b g$ 做叉乘可得到误差向量 $\hat{e}$, 即:

$$\hat{e} = {}^b \hat{g}_a \times {}^b g \quad (14)$$

该误差向量表示将估计值向量旋转到与加速度计估计向量平行所需旋转的方向和旋转量。误差向量 $\hat{e}$ 通过 PI 运算后与陀螺仪输出的 ω 进行融合, 即:

$$\tilde{\omega} = k_p \hat{e} + k_i \sum \hat{e} \cdot \Delta t + \omega \quad (15)$$

将融合后的 $\tilde{\omega}$ 代入四元数更新方程:

$${}^n_b \dot{Q}(k+1) = \frac{1}{2} {}^n_b Q(k) \otimes \omega \quad (16)$$

式中 ${}^n_b Q$ 为 b 系相对于 n 系的四元数; ${}^n_b \dot{Q}$ 为 b 系相对于 n 系的四元数的导数; ω 为 b 系中的陀螺仪绕 x_b, y_b, z_b 3 轴测得的角速度四元数向量; $\otimes$ 为四元数乘法运算。

将当前姿态的四元数代入式(16)可得到姿态的欧拉角。

$$\begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctan2(2q_2q_3 + 2q_0q_1, q_3^2 - q_2^2 - q_1^2 + q_0^2) \\ -\arcsin(2q_1q_3 - 2q_0q_2) \\ \arctan2(2q_1q_2 + 2q_0q_3, q_1^2 + q_0^2 - q_3^2 - q_2^2) \end{bmatrix} \quad (17)$$

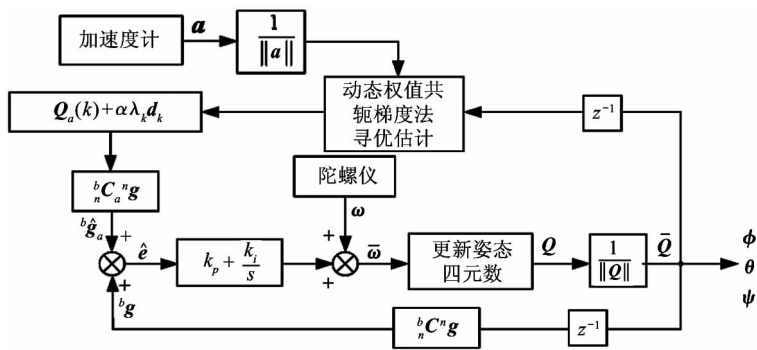


图4 共轭梯度与互补滤波融合算法结构图

3 实验测试平台

本文搭建了四旋翼飞行器实验平台(如图5所示)并将本文提出算法在该实验平台上进行验证。四旋翼飞行器的控制单元由主控模块、惯性测量模块、稳压模块、电源模块、电机驱动模块和无线通讯模块构成。其中主控模块选用了ST公司生产的基于ARM-CortexM3内核的STM32F103RCT6芯片;惯性测量模块选用美国Inven Sense公司生产的3轴陀螺仪和3轴加速度计集成芯片MPU6050,与主控模块通过IIC进行通讯;无线通讯模块选用了富斯公司的10通道2.4 GHz遥控器与PPM接收器以及2.4 GHz无线数传模块,PPM信号通过单个I/O口就能与主控通讯,无线传输距离可达700 m,无线数传模块通过串口与主控模块通讯,发送实时姿态数据到上位机;电机驱动模块是利用PWM控制电子

调速器的输出驱动无刷电机,四旋翼飞行器实验平台系统结构示意图如图6所示。



图5 四旋翼飞行器实验平台

4 测试结果及分析

为了测试算法的性能,将互补滤波法(CF)、梯度下降法(GD)、扩展卡尔曼滤波(EKF)3种算法与

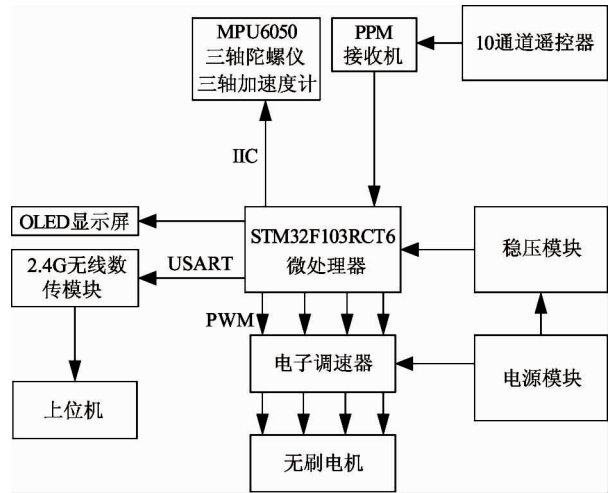


图 6 四旋翼实验平台系统结构示意图

本文提出的融合算法 (CGD + ACF) 进行比较。本文共进行了 3 组实验,分别对比了静态、姿态不变水平运动以及绕轴转动 3 种运动状态下 4 种算法的姿态跟踪性能。

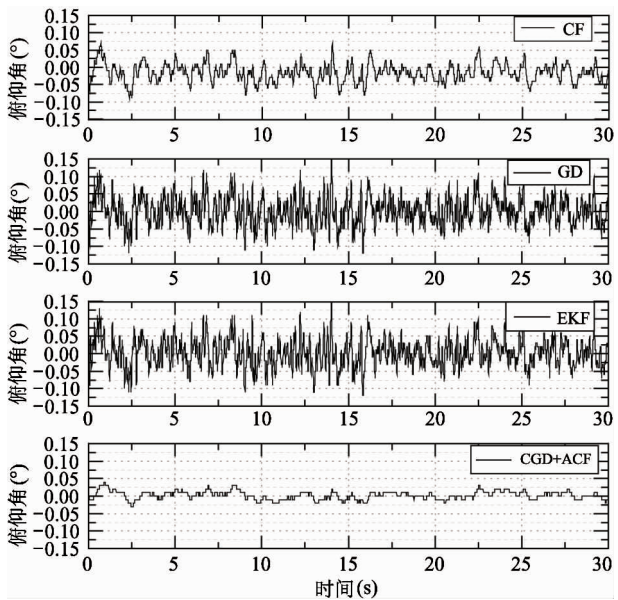
(1) 静态测试

将四旋翼放置在水平台面上,此时系统的俯仰角和横滚角的理论值为 0° 。系统俯仰角与横滚角的静态测试结果分别如图 7(a) 和图 7(b) 所示,其中互补滤波法的静态误差范围为 $-0.1^{\circ} \sim 0.1^{\circ}$,梯度下降法和扩展卡尔曼滤波静态误差范围在 $-0.15^{\circ} \sim 0.15^{\circ}$,本文提出算法静态误差为 $-0.05^{\circ} \sim 0.05^{\circ}$ 。证明本文算法具有较好的静态性能。

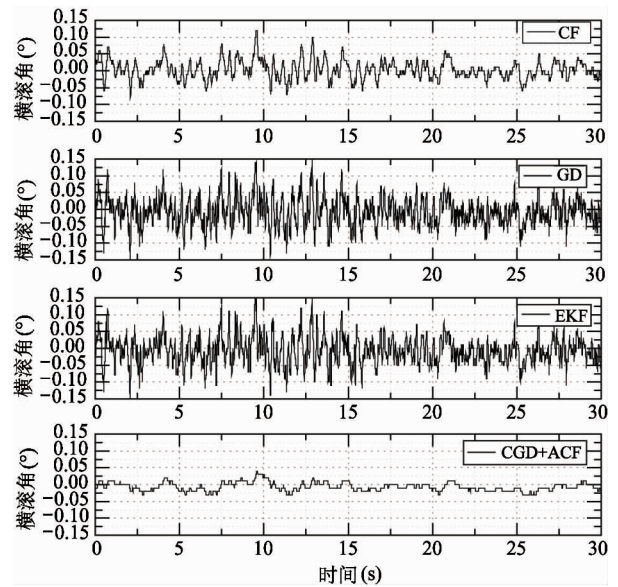
(2) 水平滑动测试

将实验平台水平放置,沿 X 轴方向快速水平滑动测量系统的俯仰角,沿 Y 轴方向水平滑动测量系统的横滚角。图 8 所示为 4 种不同算法在水平加速度运动状态下俯仰角和横滚角姿态估计结果。四旋翼水平滑动时,理论上其俯仰角和横滚角的大小为 0° 。但是在实际应用中当载体以水平姿态分别沿 X 轴和 Y 轴方向快速滑动时,由于加速度计受到运动加速度的影响,几种算法的姿态估计都产生了一定的误差。从图 8 中可以看出互补滤波算法和扩展卡尔曼滤波受到运动加速度的影响较大,其中互补滤波算法误差最大可达到 3.85° ,扩展卡尔曼滤波算法最大误差可达到 2.87° 。梯度下降法也受到一定影响,最大误差达到 1.92° 。本文算法受到加速度影响最小,误差范围不超过 0.6° 。对 4 种算法的估

计值取标准差可得到运动加速度情况下姿态估计误差,比较结果如表 1 所示。可见本文提出的算法有效减小了运动加速度对姿态估计的干扰。



(a) 4 种算法俯仰角静态测试比较结果

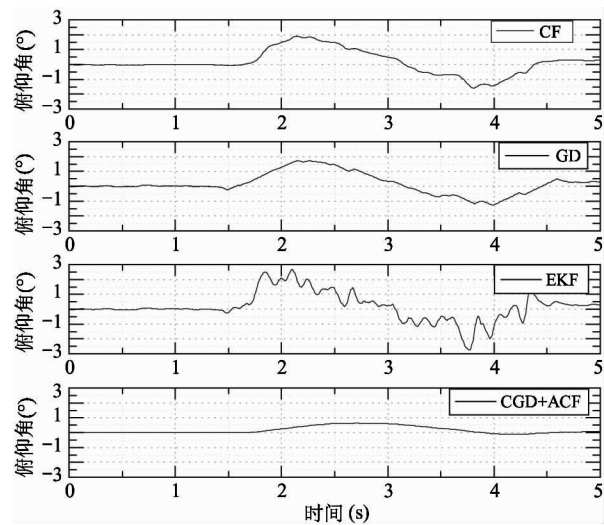


(b) 4 种算法横滚角静态测试比较结果

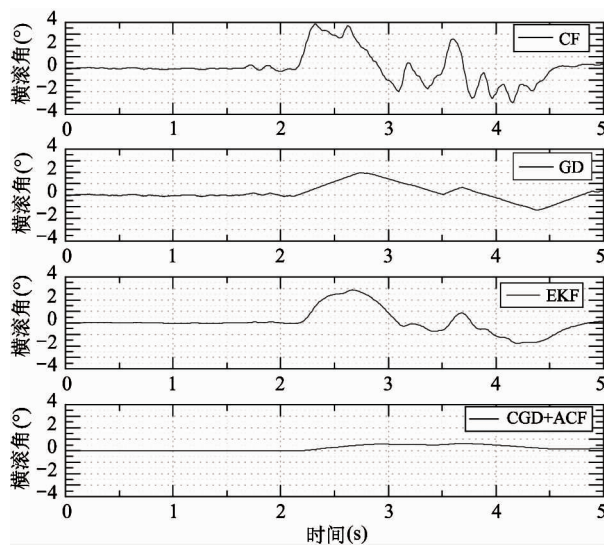
图 7 静态测试下 4 种算法比较结果

(3) 绕轴转动测试

将四旋翼分别绕 X 轴和 Y 轴快速转动并分别测量四旋翼的横滚角和俯仰角。图 9 所示为快速绕轴转动的情况下 4 种算法姿态估计值的比较结果。当姿态从 0° 到 70° 上升过程中,4 种算法的跟踪速度



(a) 4 种算法俯仰角水平运动测试比较结果



(b) 4 种算法横滚角水平运动测试比较结果

图 8 水平运动测试 4 种算法比较结果

表 1 水平运动测试下 4 种算法姿态角误差的标准差

算法	俯仰角误差标准差(°)	横滚角误差标准差(°)
CF	1.2024	1.0257
GD	0.5592	0.6824
EKF	1.5624	1.3576
CGD + ACF	0.2101	0.2303

基本相同,但是当姿态从快速变化到停止变化一段时间内 4 种算法的跟踪速度不同。扩展卡尔曼滤波算法和互补滤波算法在姿态转动停止后,姿态并没有稳定而是产生了超调,经过一段时间后才趋于稳定。其中互补滤波算法产生超调最高超过 3°,卡尔

曼滤波产生超调最高超过 5°。梯度下降算法虽然不存在超调但是载体的运动状态从快速转动到静止状态姿态跟踪会存在一定的滞后。而本文算法不存在超调且滞后时间很短。通过多次快速绕轴转动实验得出 4 种算法的姿态跟踪滞后平均时间如表 2 所示。互补滤波算法和卡尔曼滤波由于出现超调,修正过后产生了姿态跟踪的滞后,其平均滞后时间分别为 212 ms 和 156 ms,梯度下降法没有产生超调但是在梯度下降法在角度越接近真实值时收敛速度越慢,其平均滞后时间约为 188 ms。本文采用融合算法没有产生超调且平均滞后时间仅为 48 ms,提高了姿态估计的动态性能。

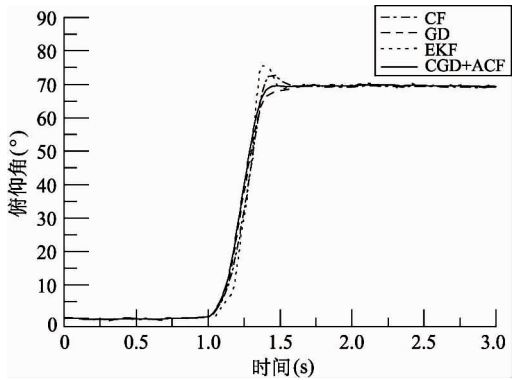


图 9 绕轴转动测试下 4 种算法比较结果

表 2 绕轴转动测试下 4 种算法姿态跟踪滞后平均时间

算法	姿态跟踪平均滞后时间 (ms)
CF	212
GD	188
EKF	156
CGD + ACF	48

5 结 论

本文提出了一种动态权值共轭梯度法和自适应互补滤波融合的姿态估计算法。将加速度计数据通过共轭梯度法得到载体的姿态四元数,考虑到加速度计和陀螺仪在不用运动状态下测量精度的不同,将其与陀螺仪的输出通过自适应互补滤波进行融合。由于飞行器在高速水平运动的情况下加速度计中的运动加速度会增大姿态估计的误差,将共轭梯度算法中加入动态权值,对加速度计中的运动加速

度向量进行估计,根据运动加速度的大小改变权值以减小运动加速度对姿态估计的影响。为了验证本文所设计算法的有效性和实用性,搭建了四旋翼飞行器实验测试平台,实验结果表明:该算法能对飞行器进行高精度的姿态角度估计,有效减小了 MEMS 易发散以及运动加速度对姿态估计的影响,在姿态快速变化的情况下具有更好的姿态跟踪性能,收敛速度较快且无超调。

参考文献

[1] 兰建军,谭力弓,朴亨,等. 惯性传感器和互补滤波器在姿态估计中的应用[J]. 制造业自动化,2013,35(17):65-67

[2] Mahony R, Hamel T, Pflimlin J M. Nonlinear complementary filters on the special orthogonal group[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, 53(5):1203-1218

[3] 张承岫,李铁鹰,王耀力. 基于 MPU6050 和互补滤波的四旋翼飞控系统[J]. 传感技术学报,2016, 29(7):1011-1015

[4] 王守华,邓桂辉,纪元法,等. 基于组合滤波的低成本飞行器姿态解算算法[J]. 计算机应用,2017, 37(5):1507-1511

[5] Madgwick S O H, Harrison A J L, Vaidyanathan R. Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient de-

scent algorithm[C] // Proceedings of IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics, Zurich, Switzerland, 2011: 5975346

[6] Madgwick S. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays[R]. Bristol: University of Bristol, 2010

[7] 孙金秋,游有鹏,傅忠云. 基于共轭梯度法和互补滤波相结合的姿态解算算法[J]. 传感技术学报,2014(4):524-528

[8] 傅忠云,刘文波,孙金秋,等. 自适应混合滤波算法在微型飞行器姿态估计中的应用[J]. 传感技术学报,2014(5):698-703

[9] 王松,田波,战榆莉,等. 基于修正 EKF 的微型飞行器姿态估计[J]. 高技术通讯,2011, 21(6):612-618

[10] Abas N, Legowo A, Ibrahim Z, et al. Modeling and system identification using extended Kalman filter for a quadrotor system[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 313(7):976-981

[11] Sabatini A M. Kalman-filter-based orientation determination using inertial/magnetic sensors: observability analysis and performance evaluation [J]. *Sensors*, 2011, 11(10):9182-206

[12] Wang L, Zhang Z, Sun P. Quaternion-based Kalman filter for AHRS using an adaptive-step gradient descent algorithm [J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2015, 12:131

Attitude estimation based on the fusion algorithm of dynamic weight conjugate gradient and adaptive complementary filter

Fu Lei, Zhang Zheng, Yu Yi

(Institute of Robotics and Intelligent Systems, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)
(School of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

Abstract

Based on the conjugate gradient method with a dynamic weight and the adaptive complementary filter for attitude estimation, a fusion algorithm is proposed to solve such problems as divergence of low-cost MEMS inertial sensors, low precision and low anti-jamming ability of the single attitude estimation algorithm. The weight of the conjugate gradient method is adjusted by the carrier acceleration to remove the adverse effect of the motion acceleration. In order to reduce the interference of the drift and noise from the inertial measurement unit (IMU), the attitude quaternion which is calculated by the output of the accelerometer with dynamic weight conjugate gradient algorithm is fused with the output of gyroscope by the adaptive complementary filter. Finally, experimental results on the quadrotor with STM32 demonstrate that the proposed algorithm improves the tracking accuracy of attitude estimation and the anti-jamming ability of quadrotor with the disturbance of non-gravity motion acceleration.

Key words: attitude estimation, conjugate gradient with a dynamic weight, complementary filter, quadrotor, micro-electro-mechanical system (MEMS)