

航姿参考系统姿态算法性能优化仿真研究

李翔,李明

(桂林电子科技大学电子工程与自动化学院,广西 桂林 541004)

摘要:航姿参考系统(AHRS)利用重力及地磁场矢量观测值估计载体姿态,但采用加速度计测量重力会受到载体运动加速度的干扰而造成姿态估计误差。提出一种对运动加速度进行估计和补偿的新方法,上述方法在AHRS姿态算法外部实现运动加速度的估计与补偿,因而无需改动AHRS原有滤波器结构设计,几乎不需增加存储空间及计算量。仿真及结果表明,所提出的新方法能与各种常用AHRS姿态滤波算法相配合,能有效地消除运动加速度对姿态估计精度的影响,从而有助于提升AHRS在动态环境下的性能。

关键词:航姿参考系统;数据融合;滤波算法;动态加速度

中图分类号:TP301.6 **文献标识码:**B

Simulation Research on Performance Optimization of Attitude Algorithm for Attitude and Heading Reference System

LI Xiang, LI Ming

(School of Electronic Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

ABSTRACT: Attitude and heading reference system (AHRS) estimates the carrier's attitude according to observations of gravity and geomagnetic vectors. But the observation of gravity vector acquired by accelerometer is affected by carrier's motional acceleration, and that leads to attitude estimation error. A novel method is introduced to estimate and compensate the motional acceleration. The proposed method operates outside the attitude estimation algorithm of AHRS, and thus no modifications to the filter design or architecture of AHRS are needed, and it hardly increases storage space or computational burden. Simulation results show that the proposed method can cooperate with commonly used attitude filters, and can effectively eliminate attitude errors caused by motional acceleration. Therefore, it can enhance dynamic performance of AHRS.

KEYWORDS: Attitude and heading reference system (AHRS); Data fusion; Filtering algorithm; Motional acceleration

1 引言

基于三轴加速度计、磁强计和陀螺仪的微型航姿参考系统(attitude and heading reference system, AHRS)利用重力矢量、地磁场矢量以及载体角速度矢量的测量值对载体姿态进行估计和解算^[1,2],得到载体的航向角、俯仰角和横滚角等信息。

然而,用于测量重力的加速度计不仅对重力加速度敏

感,也对载体的运动加速度敏感。换言之,加速度计的测量值(又称“比力”)实际上是重力加速度与载体运动加速度的矢量和。因此,若直接以加速度计读数作为重力矢量的观测值,则当载体存在运动加速度时,AHRS将出现姿态误差。

现有的运动加速度抑制算法分为切换滤波法^[2-6]、估计-补偿法^[7-11]、Sage-Husa滤波法^[12,13]等类型。

本文提出一种新的运动加速度估计补偿方法。该方法不需改动AHRS原有数据融合滤波算法的设计,也几乎不占用额外的计算量和存储空间。对算法进行仿真和实验验证,结果证明所提出的新算法能有效抑制运动加速度对AHRS的干扰,且能够与多种AHRS常用姿态滤波算法相结合,简捷可靠。

基金项目:国家自然科学基金地区基金项目(61361006);广西自然科学基金青年基金项目(2015GXNSFBA139253);广西自动检测技术与仪器重点实验室主任基金项目(YQ15107)

收稿日期:2016-09-14 修回日期:2016-09-23

2 AHRS 原理概述

2.1 姿态估计原理

AHRS 利用重力加速度矢量 g 及地磁场矢量 h 对载体的航向角 ψ 、俯仰角 θ 和横滚角 ϕ 进行解算。姿态解算的过程是基于两个基本假定:①重力矢量 g 方向竖直向下;②地磁场矢量 h 的水平分量指向磁北。由 g 及 h 计算 ψ 、 θ 和 ϕ 的具体公式可参见文献[2]。

AHRS 采用三轴加速度计测量重力矢量 g ,采用三轴磁强计测量地磁场矢量 h 。然而对于加速度计而言,其测量值(比力)是重力加速度与载体运动加速度的矢量和,即

$$f = g + a \quad (1)$$

其中 f 为加速度计读数(比力), a 为载体运动加速度。为简化讨论,此处未计入传感器噪声及误差。由式(1)可见,仅当载体运动加速度 a 为零时,加速度计读数(比力) f 才等于重力加速度 g 。若 a 不为零,且其方向与重力矢量 g 不一致,则 f 将不再竖直向下。此时,若仍然将 f 直接作为 g 的观测值并依此进行姿态解算,将导致姿态出现误差。

2.2 姿态滤波算法

为改善 AHRS 动态性能,除加速度计和磁强计外,还引入了陀螺仪对载体角速度 ω 进行测量。为了对各传感器数据进行融合,并滤除原始测量数据中的噪声,需采用相应的数据融合与滤波算法,统称为姿态滤波算法。

常用的 AHRS 姿态滤波算法主要有两大类,即卡尔曼滤波与互补滤波^[2]。

卡尔曼滤波有多种衍生算法,如扩展卡尔曼滤波(EKF)、无迹卡尔曼滤波(UKF)、容积卡尔曼滤波(CKF)、中心差分卡尔曼滤波(CDKF)等。其中,在 AHRS 中应用最多的是 EKF,因其在满足精度要求的前提下具有较小的计算量。

互补滤波(complementary filtering, CF)是一类在频域进行数据融合的算法。与卡尔曼滤波相比,其计算量更小、效率更高。根据所用传递函数的阶次,AHRS 中的互补滤波算法可分为一阶、二阶和高阶算法。

此外,由于载体姿态可由欧拉角(即 ψ 、 θ 和 ϕ)、姿态四元数、方向余弦矩阵(DCM)等不同方式进行描述,故而上述每一种姿态滤波算法又可分别与不同的姿态描述方法结合而得到不同的具体实现。

需要指出,不论卡尔曼滤波或互补滤波,其主要作用是将重力 g 、地磁场 h 以及角速度 ω 的观测值加以融合而得到载体的姿态估计。若不对加速度计读数(比力)中包含的运动加速度进行专门处理,则卡尔曼滤波器或互补滤波器所得到的姿态估计仍然会因运动加速度的影响而出现误差。

3 运动加速度抑制补偿方法

3.1 切换滤波法

切换滤波法(switching filtering)的出发点是:将加速度计观测值中包含的运动加速度视为干扰信号;通过设立一定的

阈值和判据,来检测这一干扰信号的出现;在干扰出现时,即认为加速度计观测值的可信度下降,并通过调节滤波器参数来降低加速度计观测值的权重,直至将其完全舍弃。

通常采用加速度计测量值(即比力)的大小作为运动加速度判据,即:若比力的大小与重力加速度理论值有偏差,且偏差达到一定阈值,则判定载体存在运动加速度^[3-5]。也有采用角速度或角增量作为判据^[5,6],但角速度或角增量判据对线加速度无效,因而只能作为辅助判据。

判定运动加速度存在后,对于卡尔曼滤波器,常通过增大测量噪声协方差来降低加速度计观测值的权重^[4];对于互补滤波器,则通过降低截止频率来抑制运动加速度的干扰^[3,6]。极端情况下,若直接将测量噪声协方差设为无穷大,或将截止频率降为零,则加速度计观测值被完全舍弃^[2]。

切换滤波法简便易行,但其缺点是:1)算法本身并未获得运动加速度的准确信息,仅凭一个或几个判据来调整滤波器参数,不能保证有效地判别运动加速度,甚至可能出现误判;2)通过降低加速度计权重来抑制运动加速度干扰,会导致重力矢量观测信息也一并受到损失,不利于保证 AHRS 姿态精度。

3.2 估计-补偿法

估计-补偿法的基本思想是:将运动加速度作为系统的状态变量加以估计,再利用运动加速度的估计值对加速度计读数进行修正,以得到较准确的重力矢量观测值。

估计-补偿法通常用于卡尔曼滤波^[7-11]。采用此法需将运动加速度列入状态向量中,因而其主要缺点是:1)增加了滤波器的维数,从而带来计算量和存储空间需求的显著增长;2)需更改滤波器结构设计,故不适用于互补滤波。

3.3 Sage-Husa 滤波法

Sage-Husa 滤波是在卡尔曼滤波的基础上增加对过程噪声和量测噪声的估计而形成的一种滤波算法。

用于 AHRS 运动加速度抑制的 Sage-Husa 滤波法主要思想是:将加速度计读数中包含的运动加速度视为量测噪声,利用 Sage-Husa 滤波对其加以估计^[12,13]。

应当指出,Sage-Husa 滤波本质上是将待估计的噪声假定为平稳过程,即认为噪声均值和方差是常数或缓变的,从而通过对最近的若干个观测值的统计平均来估计噪声特性。但对于 AHRS 而言,载体运动加速度复杂多变,Sage-Husa 滤波难以适应。同时,Sage-Husa 滤波在对噪声进行估计时,也会不可避免地带来计算量和存储空间需求的增加。

3.4 外部信息法

此类方法是借助 AHRS 以外的传感器提供运动加速度信息,如借助空速计或 GPS 等。此类方法已超出 AHRS 的范畴,本文不作讨论。

4 运动加速度补偿新算法

4.1 运动加速度模型

不论载体运动加速度 a 的具体变化规律如何复杂,当前

采样时刻的运动加速度(记为 a_k)与下一采样时刻的运动加速度(记为 a_{k+1})之间的差值必然为有界量。作为一种简化假定,不妨将这一差值视为正态分布的随机变量,如式(1)所示

$$\delta a_{k+1} = (a_{k+1} - a_k) \sim N(0, \sigma_{acc}) \quad (2)$$

其中 σ_{acc} 为 δa_{k+1} 的标准差。从数学角度看,若 σ_{acc} 为常数,则式(1)实际上将序列 $\{a_k\}$ 作为白噪声驱动的随机游走过程,这是本文算法的第一个假定。

4.2 运动加速度估计

本文算法的第二个假定是:AHRS 所用姿态滤波算法能提供当前时刻姿态的准确估计值 $\hat{\theta}_k$ 。这一假定是估计运动加速度的前提。

不论 $\hat{\theta}_k$ 是以何种形式(欧拉角、四元数或 DCM)表示,均可由 $\hat{\theta}_k$ 计算出当前时刻重力矢量的估计值 \hat{g}_k 。又记加速度计当前时刻读数(比力)为 \tilde{f}_k ,则当前时刻的运动加速度估计值为

$$\hat{a}_k = \tilde{f}_k - \hat{g}_k \quad (3)$$

4.3 姿态及运动加速度更新

假定当前时刻姿态估计 $\hat{\theta}_k$ 与运动加速度估计 \hat{a}_k 均为已知。对于下一时刻即 $(k+1)$ 时刻,首先利用 \hat{a}_k 修正加速度计读数,得到重力矢量的观测值

$$\tilde{g}_{k+1} = \tilde{f}_{k+1} - \hat{a}_k \quad (4)$$

将重力矢量观测值 \tilde{g}_{k+1} 连同 $(k+1)$ 时刻的其它传感器读数一起作为姿态滤波算法的输入,完成姿态估计的更新,得到 $\hat{\theta}_{k+1}$ 。随后,再将姿态估计 $\hat{\theta}_{k+1}$ 及加速度计读数 \tilde{f}_{k+1} 代入式(3),计算 $(k+1)$ 时刻的运动加速度估计值 \hat{a}_{k+1} ,完成运动加速度的更新。

4.4 补偿算法的理论依据

不断重复上述 3.2 与 3.3 小节的步骤,即可实现运动加速度的持续估计与补偿。并且不难看出,这一方法对 AHRS 姿态滤波算法本身并无特殊要求,亦即滤波器的结构设计不必作任何改动。需要增加的存储空间仅仅是运动加速度估计 \hat{a}_k 本身,而补偿算法的全部计算量也仅仅是式(3)和式(4)而已。

由式(4)可以看到,本文算法对运动加速度的补偿,实际上是利用 k 时刻的运动加速度估计值 \hat{a}_k 对 $(k+1)$ 时刻的加速度计读数 \tilde{f}_{k+1} 进行修正。显然,由此得到的重力矢量观测值 \tilde{g}_{k+1} 实际上包含了从 k 时刻到 $(k+1)$ 时刻的运动加速度改变量 δa_{k+1} 。因此,上述补偿算法能否起到良好的补偿效果,关键在于两个假定,即:(1)从 k 时刻到 $(k+1)$ 时刻,运动加速度的改变量可视为白噪声;(2)在白噪声作用下,姿态滤波算法本身是稳定收敛的。

4.5 补偿算法的收敛性及其改进

当传感器噪声为白噪声且在一定限度以内时,上述第二个假定对于 AHRS 常用的姿态滤波算法而言是能够成立的。因此,本文的运动加速度补偿算法与常用的各种姿态滤波算

法相结合,可起到改善动态条件下航姿精度的效果。

但在实际使用中,一旦姿态滤波算法本身出现了较大的误差,则该误差会影响运动加速度估计 \hat{a}_k ,进而导致重力矢量观测值 \tilde{g}_k 也产生相应的偏差。由于式(3)及式(4)是在姿态滤波器外部运行,因而 \hat{a}_k 的偏差无法由姿态滤波算法本身加以修正,这一偏差将“固化”在运动加速度估计 \hat{a}_k 中而导致姿态误差不收敛。

为保证算法收敛性,可在式(3)中引入一个遗忘因子 ρ ,将式(3)改为

$$\hat{a}_k = \rho(\tilde{f}_k - \hat{g}_k) \quad (5)$$

其中 $\rho < 1$ 且接近于 1,可使 \hat{a}_k 中所含误差趋于衰减,使得姿态估计的误差是收敛的。

与已有文献中的类似方法^[7,10]相比,本文方法的创新之处在于:

- 1) 阐明了该方法的理论依据(即上文所述的两个基本假定)。
- 2) 明确指出该方法能够与各种不同的姿态滤波算法相结合,是一种普遍适用的运动加速度抑制方法。
- 3) 讨论了算法的收敛性问题及其改进措施。

5 仿真验证

5.1 仿真条件

AHRS 中各传感器的噪声均设定为白噪声,加速度计噪声标准差 $\sigma_a = 0.01 \text{ m/s}^2$,磁强计噪声标准差 $\sigma_m = 0.1 \mu\text{T}$,陀螺仪噪声标准差 $\sigma_g = 0.05^\circ/\text{s}$ 。陀螺仪零漂设定为白噪声驱动的随机游走过程,驱动噪声的标准差为 $\sigma_b = 0.05^\circ/\text{s}$ 。各传感器采样率均为 50Hz。

导航参考系采用东北地坐标系,并设定重力矢量为 $g = (0 \ 0 \ 9.8)^T \text{ m/s}^2$,地磁矢量为 $h = (40 \ 0 \ 30)^T \mu\text{T}$ 。

数值仿真采用科学计算自由软件 Scilab 进行。

5.2 本文方法与其它算法仿真对比

将 2.2 节中提到的切换滤波法、估计-补偿法、Sage-Husa 滤波法以及本文方法等 4 种算法分别与 EKF 相配合,进行仿真对比。

以式(6)所示状态方程为基础,构成 EKF 姿态算法。其中, α 为乘性姿态误差^[14], δb 为陀螺仪零漂,两者构成 EKF 状态向量。 Ω_x 表示与角速度矢量 ω 相对应的叉乘矩阵(即对任意矢量 v 均满足 $\Omega_x v = \omega \times v$ 的矩阵), $I_{3 \times 3}$ 为 3 阶单位阵。

$$\begin{pmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\delta b} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\Omega_x & I_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \delta b \end{pmatrix} \quad (6)$$

对于切换滤波法,加速度阈值设定为 $a_{th} = 0.05 \text{ m/s}^2$,当 $|\tilde{f}_k| - |g| > a_{th}$ 时舍弃加速度计读数 \tilde{f}_k 。

对于估计-补偿法,将运动加速度改变量 δa_k 加入到 EKF 状态向量中,其对应的过程噪声标准差取 $\sigma_{acc} = 5 \text{ m/s}^2$ 。

对于 Sage-Husa 滤波法,仅估计加速度计量测噪声方

差,取遗忘因子为 0.9。
假定载体沿 x 轴作变速运动,加速度变化曲线如图 1 所示,各算法滤波后的俯仰角误差变化曲线示于图 2,俯仰角平均误差见表 1。

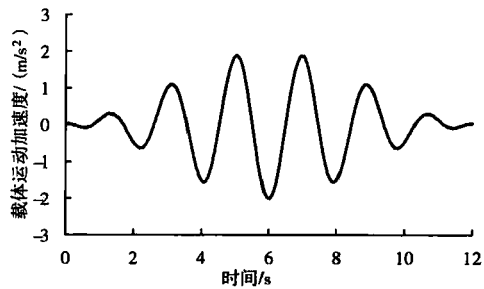


图 1 仿真中的载体运动加速度

表 1 各算法俯仰角均方根误差

| 加速度抑制算法 | 俯仰角误差(均方根) |
|--------------|------------|
| 无补偿 | 1.525° |
| 切换滤波法 | 0.198° |
| 估计-补偿法 | 0.417° |
| Sage-Husa 滤波 | 0.449° |
| 本文方法 | 0.147° |

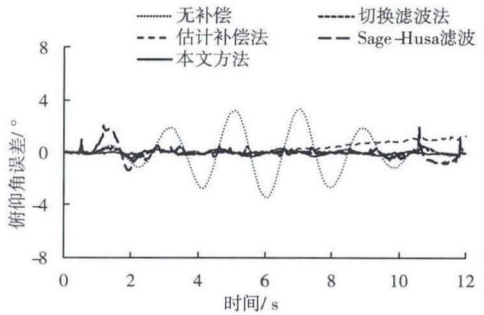


图 2 各种加速度抑制算法仿真结果

由图 2 和表 1 可见,若不采取任何补偿措施,则载体的运动加速度会使 EKF 出现显著的姿态误差,而切换滤波法、估计-补偿法、Sage-Husa 滤波法以及本文算法均能起到减小姿态误差的作用。
由表 1 还可看到,采用估计-补偿法和 Sage-Husa 滤波法进行运动加速度补偿时,姿态误差相对较大。并且这两种算法均占用较多存储空间及计算量,因而实用性欠佳。
相比之下,切换滤波法以及本文算法只需简单的步骤即可很好地抑制载体运动加速度的影响,使姿态误差明显降低。与其它方法相比,本文方法最为简捷且效果最佳。
5.3 本文方法与各种姿态滤波算法结合
仍采用上述仿真条件,将本文方法分别与 UKF 和互补滤波(CF)算法相结合。其中,互补滤波算法采用二阶传递

函数,参数设定为:比例环节 $K_p=0.5$,积分环节 $K_i=0.1$ 。
UKF 及 CF 仿真结果分别见图 3 与图 4。俯仰角误差(均方根)统计结果见表 2,表中还列出了 EKF 的仿真结果以便对比。

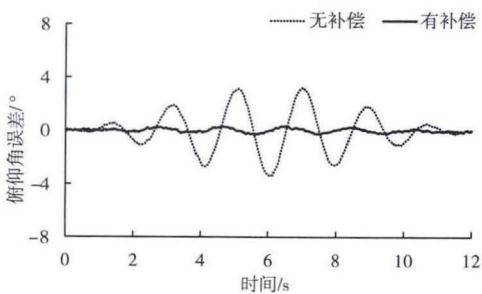


图 3 UKF 仿真结果

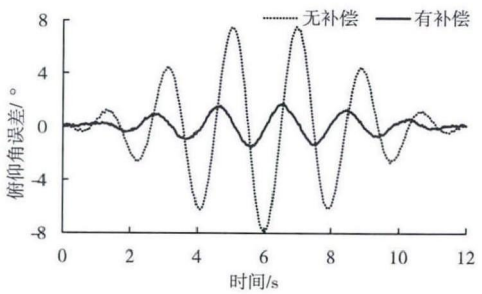


图 4 互补滤波仿真结果

表 2 不同姿态滤波算法仿真对比

| 姿态滤波算法 | 俯仰角误差(均方根) |
|----------|------------|
| EKF(无补偿) | 1.525° |
| EKF(有补偿) | 0.198° |
| UKF(无补偿) | 1.467° |
| UKF(有补偿) | 0.141° |
| CF(无补偿) | 3.493° |
| CF(有补偿) | 0.707° |

由图 3、图 4 可见,本文方法无论与 UKF 或 CF 配合,均能有效地抑制载体运动加速度的不利影响,显著提高姿态精度。由表 2 可见,各姿态算法与本文方法相结合后,姿态误差均比无补偿时减小了 70% 以上。因此,本文方法确是一种简捷有效且普遍适用的运动加速度抑制算法。
另一方面,由表 2 所列数据还可看出,未补偿运动加速度时,姿态误差大小顺序为 $CF > EKF > UKF$;而采用本文方法补偿后,姿态误差大小顺序也是 $CF > EKF > UKF$ 。由此可知,姿态算法本身精度越高,则与本文方法相配合时抑制动态加速度的效果也越好。
6 实物验证
在 AHRS 中,将本文方法与互补滤波相结合,验证实际

效果。

AHRS 采用 MPU9250 传感器,该传感器在同一芯片内集成了三轴加速度计、三轴磁强计和三轴陀螺仪。经实测,MPU9250 所含加速度计噪声标准差 $\sigma_a \approx 0.01 \text{ m/s}^2$,陀螺仪噪声标准差 $\sigma_g \approx 0.05^\circ/\text{s}$,与前述仿真条件基本一致,而磁强计噪声标准差则达到 $\sigma_m \approx 2\mu\text{T}$ 。

实验中将 AHRS 水平置于速率转台上,绕竖直轴进行圆周运动,AHRS 的 x 轴沿切线方向,y 轴指向转轴。AHRS 距转轴约 0.5m,旋转过程为:首先在 3s 内由静止加速至 $90^\circ/\text{s}$ (即角加速度设定为 $30^\circ/\text{s}^2$),然后匀速旋转 40s,再在 3s 内减速至静止。

表 3 给出了有、无加速度补偿时航姿误差对比,其中采用本文方法补偿时分两种情形:一是直接采用式(3)与式(4)估计运动加速度;二是用式(5)代替式(3),并取 $\rho = 0.995$ 。图 5 为根据加速度计读数推算的切向加速度与法向加速度。直接采用式(3)与式(4)估计得到的切向和法向加速度如图 6,改用式(5)并取 $\rho = 0.995$ 得到的结果如图 7。

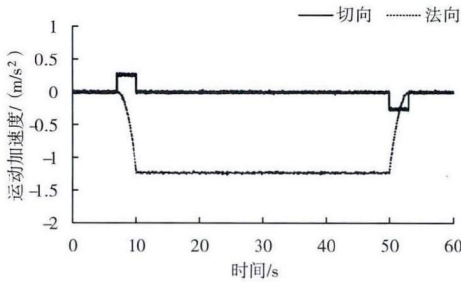


图 5 由加速度计推算的运动加速度

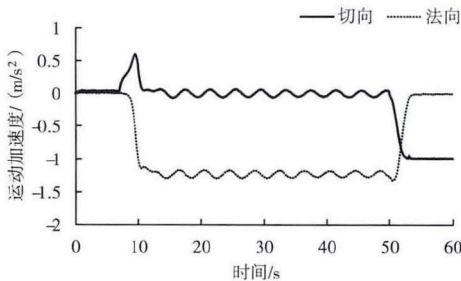


图 6 本文方法估计的运动加速度

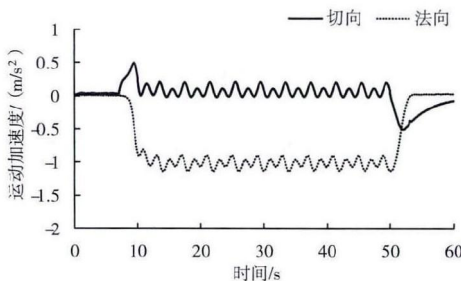


图 7 本文方法估计的运动加速度 ($\rho = 0.995$)

表 3 AHRS 实测航姿误差(均方根)

| | 航向角误差 | 俯仰角误差 | 横滚角误差 |
|-----------------------|--------------|--------------|--------------|
| 无补偿 | 3.26° | 1.15° | 2.62° |
| 有补偿 | 1.43° | 2.00° | 0.64° |
| 有补偿($\rho = 0.995$) | 0.83° | 0.75° | 0.70° |

由图 6 可见,由于姿态算法本身的误差导致运动加速度的估计值出现一定波动。但与图 5 相比可知,法向加速度大体上得到了正确反映,而切向加速度由于数值较小,导致估计效果不理想。尤其当转台停止转动后,切向加速度仍将维持较大误差而不收敛。这与表 3 所列结果相吻合,即:采用本文方法补偿运动加速度,但未引入遗忘因子时,航向角与横滚角误差得到改善,而俯仰角误差反而增大。

另一方面,由图 7 可见,引入遗忘因子 $\rho = 0.995$ 后,一旦载体恢复静止,切向加速度的误差即趋于衰减,从而保证了姿态估计的收敛性。由表 3 可知,采用本文方法且引入遗忘因子后,航向角、俯仰角和横滚角的误差(均方根)均可减小到 1° 以内。

综上,本文方法与互补滤波相配合,能削弱运动加速度影响,改善动态航姿精度。

7 结论

针对 AHRS 航姿精度易受载体运动加速度影响的问题,本文提出了一种运动加速度估计及补偿方法。该方法不需更改姿态滤波算法结构设计,几乎不增加存储空间与计算量。阐明了该方法的理论基础,并给出改善其收敛性的措施。通过仿真和实验证明,该方法可与 EKF、UKF、互补滤波等各种常用的姿态滤波算法相结合,能够有效抑制载体运动加速度的干扰,提高 AHRS 在动态条件下的航姿精度。

参考文献:

[1] 吴涛,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.

[2] 丁君,赵忠华. AHRS 航姿解算中的两种滤波方法的比较研究[J]. 计算机仿真,2013,30(9): 60-65.

[3] 孙金秋,游有鹏,傅忠云. 基于自适应显式互补滤波的姿态解算方法[J]. 测控技术,2015,34(4): 24-27,31.

[4] 楚仕彬,袁亮. 小型四旋翼无人机姿态测量仿真研究[J]. 计算机仿真,2015,32(2): 67-73.

[5] 吴中华,等. 基于 UKF 的无人机航姿系统算法研究[J]. 计算机仿真,2014,31(8): 41-44,77.

[6] 王立,章政,孙平. 一种自适应互补滤波姿态估计算法[J]. 控制工程,2015,22(5): 881-886.

[7] Jung Keun Lee, E J Park, S N Robinovitch. Estimation of attitude and external acceleration using inertial sensor measurement during various dynamic conditions[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012, 61(8): 2262-2273.

(下转第 105 页)



图7 $M=0.6, \alpha=7^\circ$ 时三种机翼流态

6 结论

本文利用 F-4 标模进行了算法研究,证明了算法的可信性。之后用于竖直段加横侧段机翼气动性能研究。研究表明,通过在竖直段上加横侧段机翼后使机翼表面流动、空间流动及涡量分布得到明显改善,不仅对翼梢涡有削弱、破碎作用,显著减弱了展向流动,改善了机翼的展向压力分布,

同时削弱了局部激波的强度,减小了负升力。因此,在竖直段加横侧段机翼对基本机翼流动具有全面的改善作用,和基本机翼相比,诱导气动性能提高了约 11%,和加竖直段机翼相比,诱导气动性能提高了约 4%。

参考文献:

- [1] 连婷婷,张彬乾,陈真利. C 型机翼几何参数影响规律和流动机理研究[J]. 航空计算技术,2008-3,38(2).
- [2] 付伟,赵旭,司亮. 翼梢小翼几何参数对机翼气动特性影响研究[J]. 科学技术与工程,2010-5,10(14).
- [3] 吕飞,陈迎春,张彬乾. 螺旋式翼梢小翼减阻技术研究[J]. 机械科学与技术,2012-1,31(1).
- [4] Ilan Kroo. Nonplanar Wing Concepts for Increased Aircraft Efficiency[C]. VKI Lecture Series on Innovation Configurations and Advanced Concepts for Future Civil Aircraft, June 6-10. 2005.
- [5] 舒桃,余永亮,陆夕云,庄礼贤. 二维翼大迎角绕流湍流模型及涡控制的数值研究[J]. 中国科学技术大学学报,2000,30(4).
- [6] 杨宇飞,白俊强,夏露. 飞翼布局运输机气动设计方法研究[J]. 航空计算技术,2007-1,37(1).



[作者简介]

叶 露(1983-),男(汉族),湖北洪湖人,讲师,研究方向:飞机气动布局设计、飞行性能与飞行安全、飞行程序、航行新技术的应用。

(上接第 64 页)

- [8] 肖文健,路平,张曦郁. 一种面向机动的航姿测量系统设计[J]. 光电与控制,2014,21(5): 83-87.
- [9] G Ligorio, A M Sabatini. A novel Kalman filter for human motion tracking with an inertial-based dynamic inclinometer[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2015, 62(8): 2033-2043.
- [10] 杜红彬,康小明,杨克洙. 基于旋转矩阵 KF 的低成本 MEMS 姿态解算[J]. 测控技术,2016,35(2):52-57.
- [11] 孟唐宇,浦剑涛,方建军. 姿态解算与外力加速度同步估计算法[J]. 计算机应用,2016,36(5):1469-1474.
- [12] 张欣,等. 多旋翼姿态解算中的改进自适应扩展 Kalman 算法[J]. 光学精密工程,2014,22(12):3384-3390.
- [13] A Makni, H Fourati, A Y Kibangou. Adaptive Kalman filter for MEMS-IMU based attitude estimation under external

acceleration and parsimonious use of gyroscopes[C]. 13th European Control Conference, ECC 2014, Strasbourg, France, June 24-27, 2014: 1379-1384.

- [14] Jiao Yuanyuan, et al. Linearization error's measure and its influence on the accuracy of MEKF based attitude determination method[J]. Aerospace Science and Technology, 2012, 16(1): 61-69.



[作者简介]

李 翔(1984-),男(汉族),广西玉林人,博士,讲师,硕导,主要研究领域为智能传感器。

李 明(1990-),男(汉族),河南郑州人,硕士研究生,主要研究领域为精密测量与智能控制。