

## Horizontal Attitudes Determination Based on Gravity Adaptive Complementary Filter for Unmanned Helicopter\*

SHI Zhining, HAN Bo\*, XU Yu, LI Ping

(Institute of Industrial Process Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** The co-stabilizer for unmanned helicopters can estimate and stabilize the horizontal attitudes automatically. Horizontal attitudes determination is the groundwork of the co-stabilizer's servo control. Considering the co-stabilizer's low-cost characteristic and its full-of-maneuver working environment, this paper designed a gravity adaptive complementary filter based horizontal attitude determination system. The complementary filter fused information from two sources; one is the rotation state information based on measurement of rate gyros, the other is the observation information based on measurement of accelerators. The complementary filter proposed in this paper uses an adapted low-frequency filter, providing even neater measurements. The system was implemented on a MCU. More data analysis and comparison conclude that the proposed horizontal attitude determining system is not only low-cost but also precision-credible.

**Key words:** co-stabilizer; attitude determination; complementary filter; adaptive filter

EEACC: 1270; 6140

## 基于重力场自适应互补滤波的无人直升机 水平姿态估计方法\*

史智宁, 韩波\*, 徐玉, 李平

(浙江大学工业控制技术研究所, 杭州 310027)

**摘要:** 无人直升机姿态平衡仪能自主识别飞机水平姿态并自动进行姿态增稳, 可大大降低无人直升机手动遥控的难度。针对姿态平衡仪的低成本要求和应用环境高机动性特点, 提出了一种基于重力场自适应互补滤波的水平姿态估计方法。该方法用陀螺仪和加速度计输出进行互补滤波来估计可解算水平姿态的重力场, 并自适应调整滤波器增益以减小运动加速度对重力测量的影响。实验证明, 该方法测量精度高, 易于单片机实现, 可以满足姿态平衡仪的应用要求。

**关键词:** 平衡仪; 姿态估计; 互补滤波; 自适应滤波

中图分类号: V279

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2009)07-0993-04

无人直升机姿态平衡仪能自主识别飞机水平姿态并自动进行姿态增稳, 可大大降低无人直升机手动遥控的难度。目前应用最多的是 FMD 公司的红外平衡仪。红外平衡仪利用两对红外线感应器感受地面水平线温度以确定飞机平衡姿态, 能进行独立测量, 但红外线感应器易受雾、云层、雨雪甚至地形变化等环境影响而失灵<sup>[1]</sup>。基于惯性测量的姿态估计可以大大扩展姿态平衡仪应用的时空范围。一般导航用的 GPS/INS 姿态估计方法<sup>[2-4]</sup>, 成本过高, 不

适用于平衡仪; 基于重力加速度测量信号的倾角估计解算简单, 但用于运动载体姿态估计时, 运动加速度会使重力加速度测量产生较大误差<sup>[2,5-6]</sup>。

互补滤波能较好地结合陀螺仪角速度的动态性能和加速度计的静态精度, 可以剔除高频运动加速度, 在低成本的 INS 导航系统中应用较广。基于重力场互补滤波的姿态估计算法简单, 硬件成本低廉, 适合姿态平衡仪应用<sup>[6]</sup>, 但是互补滤波器低通阻带衰减较慢, 噪声较大时滤波效果不理想。本文参考

模糊互补滤波<sup>[7]</sup>设计了重力场自适应互补滤波器用于平衡仪姿态估计,可以滤除高频和大数值的低频运动加速度信息,达到较高的测量精度。该水平姿态估计方法在单片机上实现,软硬件成本低,测量精度比固定参数的互补滤波器更好,可以为姿态平衡仪提供可靠的姿态控制基础。

## 1 基于重力加速度的水平姿态解算

姿态平衡仪必须实时检测水平姿态并反馈控制使飞机保持水平。水平姿态即飞机与水平面的夹角,在纵向和横向上分别为俯仰角和横滚角。在低成本的惯性测量单元中,用重力加速度信息直接解算水平姿态,可以避免陀螺仪直接积分的复杂坐标转换。设  $g_x^b, g_y^b, g_z^b$  分别为载体坐标系下  $x$  轴、 $y$  轴、 $z$  轴方向上的重力加速度分量,利用北东地坐标系到飞机载体坐标系的转换矩阵  $C_n^b$ ,可分别由式(1)、式(2)解得机体俯仰角  $\theta$  和横滚角  $\varphi$ :

$$\theta = -\arcsin(g_x^b/g) \quad (1)$$

$$\varphi = \arctan(g_y^b/g_z^b) \quad (2)$$

可以看出,当横滚角为  $\pm\pi/2$  时,姿态解算产生奇异,但在载体相对于水平面倾斜不大的应用场合,如无人直升机是否偏离水平的检测等,式(1)、(2)解算载体的平衡姿态完全适用。在实际应用中,该姿态解算方法可以根据微机械加速度计输出直接解算静止载体的水平倾角。但在运动载体上,加速度计测量输出的是重力加速度与运动加速度叠加量,该姿态解算方法直接应用会产生较大的姿态估计误差,此时基于重力加速度解算水平姿态的首要问题是获取载体的实际重力加速度值。

## 2 重力场自适应互补滤波

### 2.1 重力场互补滤波器设计

根据姿态运动分析,北东地坐标系到载体坐标系的转换矩阵  $C_n^b$  求导为<sup>[8]</sup>

$$\dot{C}_n^b = -\omega \times C_n^b \quad (3)$$

$\omega = [p \ q \ r]$  是角速度向量表示,  $p, q, r$  分别是载体绕  $x$  轴、 $y$  轴、 $z$  轴旋转的角速度。可以求得载体坐标系下的重力加速度运动状态方程为<sup>[6]</sup>:

$$\dot{g}^b = \dot{C}_n^b g^n = -\omega \times C_n^b g^n = -\omega \times g^b \quad (4)$$

重力加速度分量的观测方程则可由式(5)给出:

$$f = a - \hat{g} + n \quad (5)$$

其中  $f$  为加速度计测量输出向量,  $a$  为载体运动加速度向量,  $\hat{g}$  为载体坐标系下的重力向量,  $n$  表示观测噪声。

陀螺仪动态特性良好,是高频有效信息,而加速度计静态测量准确,是低频有效信息。重力加速度运动状态与观测信息在频率上具有互补特性。对于重力加速度,互补滤波方程为<sup>[6]</sup>:

$$g(s) = \frac{kg(s)}{(s+k)} + \frac{sg(s)}{(s+k)} \quad (6)$$

式中  $\frac{k}{(s+k)}$  具有低通特性,而  $\frac{s}{(s+k)}$  具有高通特性,取与之对应的低频和高频段  $g(s)$  信息代入式(6)可得:

$$g(s) = \frac{kg(s)}{(s+k)} - \frac{\omega(s) \times g(s)}{(s+k)} \quad (7)$$

忽略陀螺仪和加速度计的测量噪声,重力场互补滤波器在时域可表示为:

$$\dot{\hat{g}}^b = -[\omega \times] \hat{g}^b - k(f + \hat{g}^b) \quad (8)$$

重力场互补滤波器融合了重力加速度状态信息中的陀螺仪动态性能和观测信息中的加速度计低频精度,可以获得具有良好测量精度和动态性能的重力加速度信息。

### 2.2 自适应互补滤波

要使互补滤波器较好地结合低频信息的精度和高频信息的动态性能并滤除不必要的噪声,关键在于确定低通滤波参数  $k$ 。 $k$  较小时,截止频率较低,重力场互补滤波的测量结果主要依赖含角速度的运动状态信息,易受陀螺仪的时间漂移的影响; $k$  较大时,截止频率较高,不容易滤除低频的、幅值较大的运动加速度。

文献[7]中的互补滤波器引入模糊机理实时推导参数  $k$ ,获得了比固定参数互补滤波<sup>[2,5-6]</sup>更好的姿态估计效果。本文参考文献[7],设计了符合单片机实现的重力场自适应互补滤波器。自适应滤波器根据重力加速度观测信息大小设计简单的自适应算法,实时调整低通滤波参数  $k$  的大小。其中自适应算法为:

$$k_{i+1} = \begin{cases} -m|f_{i+1} - \hat{g}_i| + \lambda, & \text{当 } |f_{i+1} - \hat{g}_i| < \frac{\lambda}{m} \\ 0, & \text{当 } |f_{i+1} - \hat{g}_i| \geq \frac{\lambda}{m} \end{cases} \quad (9)$$

$i$  表示信息更新次序,  $m, \lambda$  都大于 0。每次滤波之前先根据加速度计的测量结果与重力加速度的差值计算出低通滤波系数  $k$ ,差值越大,  $k$  越小,低通滤波截止频率越低。 $m, \lambda$  都可以根据应用环境的噪声情况综合确定:  $\lambda$  要在运动加速度不大时保证互补滤波静态精度;  $m$  的选择可以根据互补滤波可以容忍的上限值  $\lambda/m$  确定。

3 系统实现与实验结果

3.1 系统实现

根据平衡仪体积小、成本低的要求, 基于重力场互补滤波的平衡姿态估计系统主要由 ADX103/203 微机械加速度计、ADXRS300 微机械陀螺仪和单片机构成。由于低成本硬件的性能有限, 为了让平衡仪在噪声复杂的环境下保持良好的工作状态, 本文分别采用了文献[9]和文献[10]所述方法对陀螺仪和加速度计进行简单校正, 而复杂的校正参数获取程序在 PC 机上离线完成。姿态估计中的反三角函数运算则采用了文献[11]所述的 CORDIC(COordinate Rotation Digital Computer)算法来计算。与 PC 机运算结果相比, 在单片机中用 CORDIC 算法计算的反三角值误差在  $0.1^{\circ}$  以下[5]。

为了避免单片机内的浮点运算, 本文在重力场互补滤波算法实现程序中将全部采样信号线性放大, 进行整数运算。

3.2 实验结果

为了验证算法性能, 本文进行了静态和动态实验。静态实验中, 将基于重力自适应互补滤波的姿态估计系统置于桌面保持静止。取  $m=16, \lambda=3$ , 小车静止时,  $\lambda$  保持不变, 自适应重力互补滤波器输出的水平估计结果如图 1 所示:

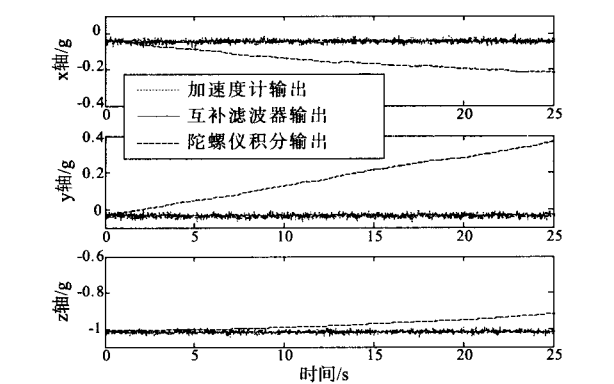


图 1 静止时的重力加速度估计

从图 1 可以看出, 带量测噪声的加速度计输出值毛刺较多; 含陀螺仪角速度信息的运动状态积分估计的重力值则随着时间大幅值漂移; 而重力互补滤波器输出的重力估计值与加速度计输出值均值相近, 但比加速度计输出更为平滑, 比运动状态积分具有更好的静态精度。

动态实验分两次进行。动态实验一是将基于重力自适应互补滤波的姿态估计系统固定在水平小车上, 在相对水平的地面上水平推动小车, 得到基于固

定参数互补滤波、加速度计直接输出和自适应互补滤波的水平姿态估计值如图 2 所示。

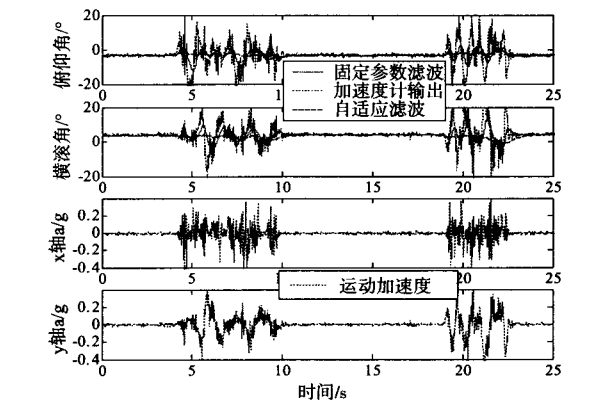


图 2 水平动态中的姿态估计

由图 2 知, 在  $x$  轴运动加速度为  $0.42g$  时, 加速度计估计的俯仰角最大偏差达  $24.4^{\circ}$ , 固定参数互补滤波器估计的俯仰角最大偏差为  $9.1^{\circ}$ , 自适应互补滤波器估计的俯仰角最大偏差仅为  $1.1^{\circ}$ ;  $y$  轴最大运动加速度  $0.55g$ ,  $z$  轴重力加速度测量也有偏差时, 加速度计估计的横滚角最大偏差  $35^{\circ}$ , 固定参数重力互补滤波器估计的横滚角偏差为  $7.3^{\circ}$ , 重力场自适应互补滤波器估计的横滚角偏差最大仅为  $4.5^{\circ}$ 。结合式(1)、式(2)分析可知, 自适应互补滤波器的低通部分  $3g(s)/(s+3)$  将运动加速度滤去至少  $2/3$ 。细看图 2 中的姿态曲线, 固定参数重力互补滤波器估计的姿态受运动加速度的低频分量影响较大, 这主要跟互补滤波器的固定低通截止频率较低 ( $0.5\text{Hz}$ ) 有关, 自适应互补滤波器可以根据加速度计观测量变化大小自动调整滤波参数, 运动加速度中数值较大的低频分量对姿态估计结果影响不大。

动态实验二中, 将 INNALABS 公司的 AHRS 航姿参考系统和本文的姿态估计系统固定在同一平面上, 绕横纵轴转动平面, 得到水平姿态估计数据如图 3 所示。

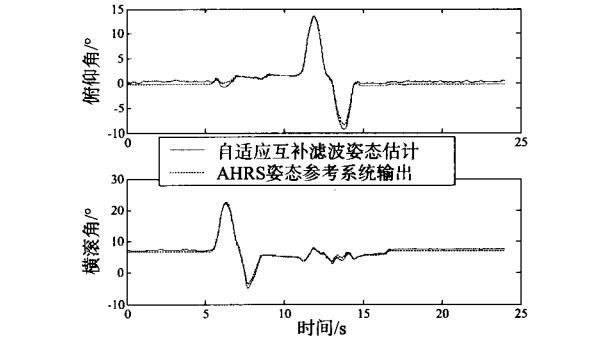


图 3 转动动态中的姿态估计

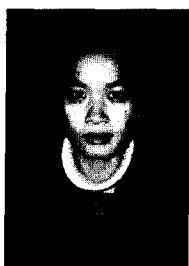
从图3中可以看出,本文的水平姿态估计系统动态性能良好,大姿态估计精度比小姿态估计精度稍差,这主要是CORDIC算法对大姿态角估计的精度下降所致。考虑到系统的硬件和计算成本,本文设计的基于重力场自适应滤波的水平姿态估计系统的测量精度已经非常高。

## 4 结论

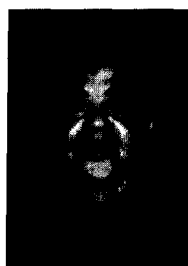
本文从平衡仪的低成本和高机动性应用要求出发,设计了基于重力场自适应互补滤波的平衡姿态估计系统。与一般的姿态估计方法不同,本文主要着眼于机动状态下的重力分量估计。用包含陀螺仪信息状态量与加速度计测量的观测量自适应互补滤波,结合了陀螺仪的动态特性和加速度计的静态精度,能够估计高频运动状态下的有效重力加速度值,滤除了高频和大数值的低频运动加速度信息,在静态和动态中都具有较高的水平姿态估计精度。

## 参考文献:

- [1] FMA, Inc. FS8 Co-Pilot Reference Manual[S]. 2007.
- [2] 徐玉,李平,韩波.一种面向机动的低成本姿态测量系统[J].传感技术学报,2007,20(10):2272-2275.
- [3] Ravindra Babu, Wang Jinling. Ultra-Tight GPS/INS/PL Integration: A System Concept and Performance Analysis[J]. GPS Solutions. 2009, 13(1):75-82.
- [4] Jason Jarrell, Yu Gu, Brad Seanor et. al. Aircraft Attitude, Position, and Velocity Determination Using Sensor Fusion[C]// AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, Honolulu, Hawaii, 2008; 18-21.
- [5] 孔维刚. 微型无人直升机飞行控制系统研究与设计[D]. 硕士学位论文. 南京理工大学, 2006.
- [6] 徐玉. 小型无人机低成本飞控平台研究[D]. 博士学位论文. 浙江大学, 2008.
- [7] Sung Kyung Hong. Fuzzy Logic Based Closed-Loop Strapdown Attitude System for Unmanned Aerial Vehicle(UAV)[J]. Sensors And Actuators A. 2003, 107(2):109-118.
- [8] Phillips W F, Hailey C E. Review of Attitude Representations Used for Aircraft Kinematics[J]. Journal of Aircraft, 2001, 38(4):718-223.
- [9] 顾春杰,周百令,张雪等. 动力调谐陀螺仪温度补偿技术研究[J]. 传感技术学报, 2006, 19(6):2481-2487.
- [10] Gebre-Egziabher D, Elkaim G H, Powell J D, et. al. Calibration of Strapdown Magnetometers in Magnetic Field Domain[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2006, 79(2):87-102.
- [11] R. Andraka. A Survey of CORDIC Algorithms for FPGA Based Computers[C]// Proceedings of the 1998 ACM/SIGDA 6th International Symposium on Field Programmable Gate Arrays, 1:191-200.



史智宁(1985-),女,湖南郴州人,硕士研究生,主要研究方向为无人机惯性导航,znshi@iipc.zju.edu.cn



李平(1954-),男,广西北流人,浙江大学工业控制研究所教授,博士,博士生导师,主要研究方向为复杂工程系统建模、控制与优化,混杂系统理论,企业综合自动化系统,智能交通系统,空中机器人建模、控制与导航,pli@iipc.zju.edu.cn



韩波(1969-),男,浙江慈溪人,浙江大学工业控制研究所副研究员,博士,主要研究方向为计算机控制,嵌入式系统,空中机器人控制与导航,bhan@iipc.zju.edu.cn