

基于六加速度计的陀螺仪漂移补偿算法的研究*

李启光, 张海龙, 郝静如

(北京信息科技大学 机电工程学院, 北京 100192)

摘要: 为满足机动无人机姿态测量的需求, 尝试了一种新的陀螺仪漂移补偿方案: 对6只加速度计按回转轴对称布局, 从而解算出角速度; 并利用 Kalman 滤波对该解算角速度与陀螺仪的输出进行融合, 通过反馈校正来实现对陀螺仪漂移的补偿。仿真结果证明: 该方案能有效补偿陀螺仪漂移, 具有一定工程应用价值。

关键词: 卡尔曼滤波; 陀螺仪; 加速度计; 漂移补偿; 算法

中图分类号: V249.32

文献标识码: A

文章编号: 1000-9787(2009)12-0042-03

Research on the algorithm of drift compensation based on gyroscope with six accelerometers*

LI Qi-guang, ZHANG Hai-long, HAO Jing-ru

(Department of Mechanical Engineering, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: In order to meet the need of attitude measuring of UAV, a new compensation solution for gyro is attempted, six accelerometers are arranged symmetrically on the axis of rotation, then angular velocity is resolved. The angular velocity is fused with the value of gyroscope by using Kalman filter, then the gyroscope drift compensation is achieved by feedback output emendation. The simulation results show that the solution can effectively compensate drift of the gyro. It has value in engineering.

Key words: Kalman filter; gyroscope; accelerometer; drift compensation; algorithm

0 引言

MEMS 惯性传感器具有体积小、重量轻、功耗小、启动快、成本低和可靠性高的优点, 所以, 基于 MEMS 传感器的小型化航姿测量系统成为航拍无人飞行器的首选。但在航测系统中, 低成本微机械陀螺仪存在较大的漂移误差, 长时间的积分会导致测量姿态发散, 不能保证良好的航拍效果。而加速度计除了可以输出加速度值外, 在一定的情况下, 经过一定的解算还可以用于倾角测量^[1]。但由于它同时对重力加速度和运动加速度敏感, 载体做长时间机动运动时, 上述姿态测量系统会产生较大的测量误差^[2]。文献[3]利用 GPS 信号作为姿态参考向量来解决该问题, 补偿了机动加速度带来的姿态误差。本文尝试在特定环境下, 通过增加加速度计的数量, 并进行合理布局, 来实现对陀螺仪漂移的补偿。

1 加速度计位置布局

对于3只加速度计分别位于3个回转轴上的常规布局

而言, 在载体无机动加速度时, 利用加速度计的测量值可以直接求得载体的俯仰角和横滚角, 如载体的横滚角 ϕ 可由下式得到

$$\phi = \arcsin(f_i/g), \quad (1)$$

式中 f_i 为 Z 轴加速度计输出值, g 为重力加速度。但是, 这是利用地球重力加速度在载体系三轴的分量信息来反映载体的姿态信息的。因此, 这个方案理论上只有在载体无机动加速度的情况下才成立。而在实际系统中, 载体并不是保持静止或匀速运动的, 一旦载体有了机动运动, 就不再与重力加速度在载体系三轴分量一一对应, 而含有了加速运动的信息, 利用它们就不能直接求得载体的姿态信息了, 在机动状态下, 加速度计不能区分重力加速度和运动加速度, 由式(1)计算所得的姿态会产生较大误差。

基于此, 本文根据航拍无人飞行器实际航拍运行状态, 通过对加速度计位置重新布局, 经计算获取具有一定可信度的角速率, 利用此冗余信息, 借助 Kalman 滤波, 实现对陀

螺仪的校正,从而实现对陀螺仪漂移进行补偿的目的。

本系统设计的加速度计安装方式如图1所示,将6只加速度计分别放置在图1所示的A,B,C,D,E,F六处。其中,A,B两处的加速度计在飞机的机翼上,对称分布于俯仰轴,中心距为 L_1 ,2只加速度计的敏感方向为Z轴方向;C,D两处的加速度计位于机身,距离中心的距离均为 L_2 ,均敏感X轴方向;E,F两处的加速度计位于偏航轴上,距离中心的距离均为 L_3 ,二者敏感Y轴方向。

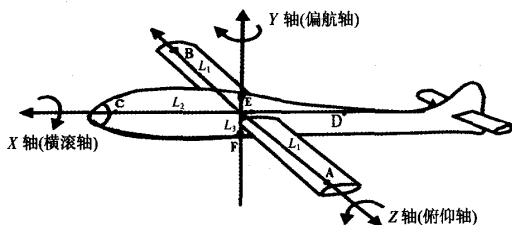


图1 六加速度计的布局

Fig 1 Layout of six accelerometers

考虑到运动加速度和飞行器转动的影响,以及加速度计安装位置不同造成的杆臂效应的影响,加速度计比力输出在载体坐标系下的分量可以表示为

$$a = f + \omega \times (\omega \times L) + \varepsilon \times L, \quad (2)$$

式中 $f = [f_x \ f_y \ f_z]$ 为质心处重力加速度和线运动加速度之和; $\omega = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]$ 为载体相对惯性坐标系的旋转角速度; ε 为相应的角加速度; L 为加速度计安装位置相对旋转轴向径。

A处加速度计敏感的是各加速度在Z轴方向的分量叠加,对照公式(2),其值为

$$a_{Az} = f_z + \omega_x \times (\omega_x \times L_1) + \omega_y \times (\omega_y \times L_1). \quad (3)$$

同理,B处加速度计输出为

$$a_{Bz} = f_z - \omega_x \times (\omega_x \times L_1) - \omega_y \times (\omega_y \times L_1). \quad (4)$$

比较式(3),式(4),A,B处的加速度计处于同一刚体上两固定点,其线加速度(重力加速度和运动加速度之和)相同,相减后得

$$a_{Az} - a_{Bz} = 2\omega_x \times (\omega_x \times L_1) + 2\omega_y \times (\omega_y \times L_1). \quad (5)$$

同理

$$a_{Cx} - a_{Dx} = 2\omega_x \times (\omega_x \times L_2) + 2\omega_y \times (\omega_y \times L_2), \quad (6)$$

$$a_{Ey} - a_{Fy} = 2\omega_x \times (\omega_x \times L_3) + 2\omega_z \times (\omega_z \times L_3). \quad (7)$$

通过式(5),式(6),式(7),可以看出:通过对应项取差值消除了线加速度项,也消除了温漂、振动等带来的有害加速度的影响,同时,也消除其他的垂直方向加速度对敏感轴方向的干扰,从而提取出旋转向心加速度影响。令

$\Delta a_1 = a_{Az} - a_{Bz}$, $\Delta a_2 = a_{Cx} - a_{Dx}$, $\Delta a_3 = a_{Ey} - a_{Fy}$, 将其代入式(5),式(6),式(7),并联立可得

$$\begin{cases} \Delta a_1 = 2\omega_x \times (\omega_x \times L_1) + 2\omega_y \times (\omega_y \times L_1) \\ \Delta a_2 = 2\omega_x \times (\omega_x \times L_2) + 2\omega_y \times (\omega_y \times L_2) \\ \Delta a_3 = 2\omega_x \times (\omega_x \times L_3) + 2\omega_z \times (\omega_z \times L_3) \end{cases} \quad (8)$$

解算该方程组,可以求得由加速度计间接解算出来3个角速度如下

$$\begin{cases} \omega_x = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\Delta a_1}{L_1} - \frac{\Delta a_2}{L_2} + \frac{\Delta a_3}{L_3}} \\ \omega_y = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\Delta a_1}{L_1} + \frac{\Delta a_2}{L_2} - \frac{\Delta a_3}{L_3}} \\ \omega_z = \frac{1}{2} \sqrt{-\frac{\Delta a_1}{L_1} + \frac{\Delta a_2}{L_2} + \frac{\Delta a_3}{L_3}} \end{cases} \quad (9)$$

2 卡尔曼滤波器设计

在理想情况下,式(9)推出的角速度值应该和陀螺仪的输出值对应相等,但是,由于加速度计和陀螺仪本身各种误差因素的存在,必然导致二者之间存在差异。也就是说,加速度计为陀螺仪提供了一组关于角速度的冗余信息。基于此,可以利用卡尔曼滤波对此二者信息进行融合,选取陀螺仪的输出值与由加速度解算出的角速度的差值作为量测信息,经过融合后,将此信息反馈给陀螺仪,进行反馈校正,就可以实现对陀螺仪漂移进行补偿的目的。本系统设计的卡尔曼滤波器如图2所示。

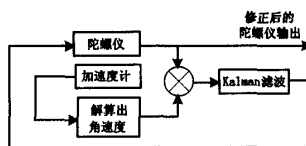


图2 卡尔曼滤波器设计

Fig 2 Design of Kalman filter

2.1 状态方程

根据大量统计规律,可以认为陀螺仪误差主要由以下三部分构成^[4]

$$\varepsilon = \varepsilon_c + \varepsilon_r + w_g, \quad (10)$$

式中 ε_c 为随机常值漂移; ε_r 为随机一阶马尔可夫过程漂移; w_g 随机白噪声漂移,其均方差为 δ_g 。

加速度计的误差可以表示为^[5]

$$\nabla = \nabla_r + w_a, \quad (11)$$

式中 ∇_r 为随机一阶马尔可夫过程漂移; w_a 为随机白噪声漂移。

将这些噪声作为状态扩充到误差方程中,状态方程为

$$\dot{X}_t(t) = F_t(t) X_t(t) + G_t(t) W_t(t).$$

其中,状态矢量为

$$X = [\varepsilon_{cx} \ \varepsilon_{cy} \ \varepsilon_{cz} \ \varepsilon_{rx} \ \varepsilon_{ry} \ \varepsilon_{rz} \ \nabla_{rx} \ \nabla_{ry} \ \nabla_{rz}]^T. \quad (12)$$

取陀螺仪随机白噪声漂移 $[\omega_{gx} \ \omega_{gy} \ \omega_{gz}]$, 陀螺仪一阶马尔可夫驱动白噪声 $[\omega_{rx} \ \omega_{ry} \ \omega_{rz}]$, 加速度随机白噪声漂移为 $[\omega_{ax} \ \omega_{ay} \ \omega_{az}]$, 则系统白噪声为

$$W(t) = [\omega_{gx} \ \omega_{gy} \ \omega_{gz} \ \omega_{rx} \ \omega_{ry} \ \omega_{rz} \ \omega_{ax} \ \omega_{ay} \ \omega_{az}]^T. \quad (13)$$

2.2 量测方程

在本系统中,利用3只陀螺仪的输出和由加速度计解

算出的角速度值的差值作为量测值,假定3个陀螺仪的输出为 $\omega'_x, \omega'_y, \omega'_z$,3个量分别与加速度计解算出的角速度做差值,可得

$$\begin{cases} \Delta\omega_x = \omega'_x - \omega_x = \omega'_x - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\Delta a_1}{L_1} - \frac{\Delta a_2}{L_2} + \frac{\Delta a_3}{L_3}} \\ \Delta\omega_y = \omega'_y - \omega_y = \omega'_y - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\Delta a_1}{L_1} + \frac{\Delta a_2}{L_2} - \frac{\Delta a_3}{L_3}} \\ \Delta\omega_z = \omega'_z - \omega_z = \omega'_z - \frac{1}{2} \sqrt{-\frac{\Delta a_1}{L_1} + \frac{\Delta a_2}{L_2} + \frac{\Delta a_3}{L_3}} \end{cases} \quad (14)$$

则可定义量测矢量为

$$\begin{aligned} Z(t) &= \begin{pmatrix} \omega'_x - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\Delta a_1}{L_1} - \frac{\Delta a_2}{L_2} + \frac{\Delta a_3}{L_3}} \\ \omega'_y - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\Delta a_1}{L_1} + \frac{\Delta a_2}{L_2} - \frac{\Delta a_3}{L_3}} \\ \omega'_z - \frac{1}{2} \sqrt{-\frac{\Delta a_1}{L_1} + \frac{\Delta a_2}{L_2} + \frac{\Delta a_3}{L_3}} \end{pmatrix} \\ &= H(t)X(t) + V(t). \end{aligned} \quad (15)$$

2.3 离散化^[6]

把状态方程和量测方程离散化,可得

$$\begin{cases} X_k = \Phi_{k,k-1} X_{k-1} + \Gamma_{k,k-1} W_{k-1} \\ Z_k = H_k X_k + V_k \end{cases} \quad (16)$$

式中 $\Phi_{k,k-1} = \sum_{n=0}^{\infty} [F(t_k)T]^n / n!$,

$$\Gamma_{k-1} = \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n!} (F(t_k)T)^{n-1} \right] \right\} G(t_k)T.$$

3 仿真实验

以系统的Z轴陀螺为例,采样频率为5 kHz,进行600 s实验。通过使用Matlab对陀螺仪的输出值和陀螺仪滤波后的值进行了仿真对比,如图(3)所示。

图3所示,通过对比可以发现,融合后的数据比之前的原始数据漂移明显收敛,这说明在无法获取GPS等外部信号的情况下,该方法可以利用惯导自身信息实现对陀螺仪漂移的有效补偿。

(上接第41页)

6 结论

研制了一种适用于回转体零件测量的柱坐标测量机,分别采用标准环规和标准锥体实现了各测头敏感方向和非敏感方向的标定,建立了数据融合的数学模型,实现了三组柱坐标系下的数据融合。该七轴综合测量系统测量精度可以达到微米级,测量不确定度在0.02 mm以内。

参考文献:

- [1] 杨仁平,张国雄,刘书桂,等. 回转曲面测量技术[J]. 天津大学学报,2005,38(5):385-390.
- [2] 郭丽莎,安立邦,郁珊娟,等. 回转体测量仪的研制[J]. 大连

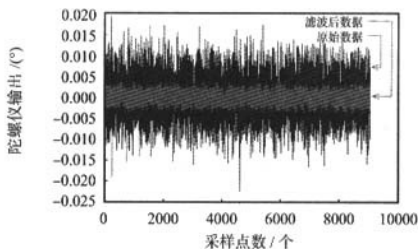


图3 陀螺仪数据仿真图

Fig 3 Simulation of gyroscope data

4 结束语

本文对6只加速度计进行合理的布局,经计算消除了加速度计示值中的以下因素:温漂、振动等带来的有害加速度,其他的垂直方向加速度对敏感轴方向的干扰、线加速度,从而解算出旋转向心加速度,即角速率。然后,利用Kalman滤波对该解算角速率与陀螺仪的输出进行融合,通过反馈校正来实现对陀螺仪漂移的补偿。仿真结果证明:该方案能有效补偿陀螺仪漂移,具有一定工程应用价值。

参考文献:

- [1] 田小芳,陆起涌,熊超. 基于加速度传感器的倾角仪设计[J]. 传感技术学报,2006,19(2):361-363.
- [2] Rehinder H, Hu X. Drift Tow 2 Free Attitude estimation for accelerated rigid bodies[J]. Automatica,2004,40(4):653-659.
- [3] 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.
- [4] 陈殿生,邵志浩,雷旭升. MEMS陀螺仪随机误差滤波[J]. 北京航空航天大学学报,2009,35(2):246-250.
- [5] 郭鹏飞. 机动加速度辅助的航姿系统扩展卡尔曼滤波[J]. 系统工程与电子技术,2009,31(3):625-628.
- [6] 申功勋,孙建峰. 信息融合理论在惯性/天文/GPS组合导航系统中的应用[M]. 北京:国防工业出版社,1998.

作者简介:

李启光(1970-),男,江苏连云港人,副教授,主要从事机械电子研究。


理工大学学报,1998,38(3):318-322.

- [3] 李琴,庞学慧,张治民,等. 高温回转体零件形位误差综合自动测量系统[J]. 现代制造工程,2007(4):88-90.
- [4] 郭东明,王晓明,贾振元,等. 天线罩几何参数测量仪研究[J]. 机械工程学,2000,36(3):41-45.
- [5] 顾强,张亚,路国英,等. 弹体外形尺寸自动检测系统[J]. 弹箭与制导学报,2008,28(4):146-148.
- [6] 张国雄. 三坐标测量机[M]. 天津:天津大学出版社,1999.

作者简介:

裘祖荣(1958-),男,上海人,博士,主要研究方向为测量技术与仪器。

基于六加速度计的陀螺仪漂移补偿算法的研究

作者: [李启光](#), [张海龙](#), [郝静如](#), [LI Qi-guang](#), [ZHANG Hai-long](#), [HAO Jing-ru](#)
作者单位: [北京信息科技大学机电工程学院, 北京, 100192](#)
刊名: [传感器与微系统](#) 
英文刊名: [TRANSDUCER AND MICROSYSTEM TECHNOLOGIES](#)
年, 卷(期): 2009, 28 (12)
被引用次数: 2次

参考文献(6条)

1. 申功勋;孙建峰 [信息融合理论在惯性/天文/GPS组合导航系统中的应用](#) 1998
2. 郭鹏飞 [机动加速度辅助的航姿系统扩展卡尔曼滤波](#)[期刊论文]-[系统工程与电子技术](#) 2009 (03)
3. 陈殿生;邵志浩;雷旭升 [MEMS陀螺仪随机误差滤波](#)[期刊论文]-[北京航空航天大学学报](#) 2009 (02)
4. 徐玉;李平;韩波 [一种面向机动的低成本姿态测量系统](#)[期刊论文]-[传感技术学报](#) 2007 (10)
5. Rehbindar H;Hu X [Drift Tow 2 Free Attitude estimation for accelerated rigid bodies](#)[外文期刊] 2004 (04)
6. 田小芳;陆起涌;熊超 [基于加速度传感器的倾角仪设计](#)[期刊论文]-[传感技术学报](#) 2006 (02)

引证文献(2条)

1. 王超, 郝静如, 李启光 [一种基于DSP和多传感器稳定平台的设计](#)[期刊论文]-[北京信息科技大学学报\(自然科学版\)](#) 2010 (2)
2. 王超, 郝静如, 李启光 [一种新型多传感器稳定平台的建模与仿真](#)[期刊论文]-[传感技术学报](#) 2010 (11)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_cgqjs200912014.aspx