

文章编号:1000-6893(2007)02-0411-04

无人机磁航向测量的自动罗差补偿研究

刘诗斌

(西北工业大学 电子信息学院,陕西 西安 710072)

Study on Automatic Magnetic Deviation Compensation of Magnetic Heading Measurement for UAV

LIU Shi-bin

(College of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

摘 要: 利用地球磁场测量无人机的航向时,需要对机上铁磁材料引起的罗差进行补偿。为了降低补偿费用,减小补偿试验时周围环境的影响,提出一种利用飞机左右盘旋飞行时采样数据实现罗差自动补偿的方法。采用椭圆假设算法,可利用飞机平飞时在多于 5 个不同方向的采样数据来自动补偿平飞时的罗差。在任意姿态飞行时,把飞机左右盘旋时采样的数据分解为 4 个椭圆,并求出它们相对于椭圆假设的 24 个系数。再利用这 24 个系数和飞机的俯仰角、倾斜角以及地磁场垂直分量求出任意姿态下罗差补偿所需的 12 个系数。实验结果表明,该方法效果良好,方便可行。某无人机补偿前最大误差为 21.5°,用传统方法补偿后最大误差为 2.3°,用本文方法几乎不需要额外的费用,补偿后最大误差为 1.6°。

关键词: 传感器技术;罗差补偿;椭圆假设;无人机;磁航向测量

中图分类号: V241.61 **文献标识码:** A

Abstract: In magnetic heading measurement of unmanned aerial vehicles (UAV), it is necessary to compensate the magnetic deviation caused by ferro-material onboard UAV. In order to lower the compensation cost and avoid the influence of surrounding ferro-material, an automatic compensation method is put forward, using the data sampled while the UAV circles in the air. Using ellipse hypothesis, one can only compensate the deviation for UAV flying in horizontal plane by the data sampled while UAV flying in more than 5 directions. When UAV flies in all possible attitudes, the relationship of sample data is described by 4 ellipses, and 24 coefficients are got by ellipse hypothesis. Using these 24 coefficients, the vertical component of earth's magnetic field and the pitch and roll angles of UAV, the 12 coefficients needed to compensate the magnetic deviation in all possible attitudes are obtained. The experimental results conform the validity and feasibility of the method mentioned. The maximum heading error of an UAV is 21.5° before compensation, and it becomes 2.3° by using a traditional method and becomes 1.6° by using the new method without almost compensation cost.

Key words: sensor technology; magnetic deviation compensation; ellipse hypothesis; unmanned aerial vehicle; magnetic heading measurement

航向是无人机的重要飞行参数之一。随着计算机技术的发展,捷联式磁航向系统已在小型飞机,特别是无人机上得到广泛应用。由于无人机体积小,机上的铁磁材料影响引起的航向误差(也称为罗差)相对较大。罗差可由 Poisson 建立的数学模型描述^[1]。对任意姿态的罗差进行补偿时,需要确定 12 个罗差系数。不同的系数确定方法将直接影响罗差补偿的效果和成本。经典的方法是在地面给定飞机的准确姿态来获得数据,根据这些数据求解 12 个系数^[2],称为给定基准法。该方法数学计算简单,但试验非常复杂,需要许多人在一块很大的且没有铁磁干扰的场地上花费将

近 1 天的时间才能完成试验。研究在飞机飞行中自动进行误差补偿的方法,对提高磁航向测量水平降低补偿试验成本有着重要意义。

要实现自动误差补偿,需要对飞行过程中的采样数据进行分析求解出罗差系数。求解方法可有多种^[3,4]。飞机平飞时,纵轴和横轴方向磁传感器的采样数据与椭圆非常接近^[5]。如果假设采样数据是椭圆(椭圆假设),可以利用椭圆拟合^[6,7]求出该椭圆。根据椭圆的参数可求出水平时的罗差系数,实现水平应用时的自动罗差补偿^[8]。这种方法仅适用于在水平状态下补偿罗差。

对于飞机的任意姿态,需要在三维空间考虑拟合问题^[9]。一种简单的方法是假设采样数据是

椭圆面上的点(椭圆面假设)。但是利用无人机飞行过程中的采样数据很难精确得到这个椭圆面的参数。本文提出一种把飞机左右盘旋时采样数据分解成4个椭圆实现罗差自动补偿的方法。

1 椭圆假设

沿飞机的纵轴 O_x 和横轴 O_z 安装两个测量地球磁场分量的磁传感器 S_x 和 S_z 。磁航向定义为从磁北顺时针转到 O_x 在水平面投影的角度。飞机平飞时,磁传感器 S_x 和 S_z 测出的磁场分量为

$$H_x = H_0 \cos \quad (1)$$

$$H_z = - H_0 \sin \quad (2)$$

式中: H_0 为地磁场的水平分量; 为磁航向。可按下式求出

$$= - \arctan \left(\frac{H_z}{H_x} \right) \quad (3)$$

如果磁航向测量没有误差,式(1)和式(2)就是以 为参数的圆。如果有误差,将反映在 H_x , H_z 的变化上。设误差使 H_x , H_z 变为 H_{xa} , H_{za} , 则它们的关系可写为

$$\begin{bmatrix} H_{xa} \\ H_{za} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{xx} & a_{xz} \\ a_{zx} & a_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_x \\ b_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

系数 a_{xx} , a_{xz} , a_{zx} , a_{zz} , b_x 和 b_z 称为误差系数。其中 a_{xx} , a_{xz} , a_{zx} 和 a_{zz} 的值由软磁材料决定; b_x 和 b_z 则由硬磁材料决定。只要确定了这6个系数,系统测得有误差的 H_{xa} , H_{za} 后,可根据式(4)解算出没有误差的 H_x , H_z 。

为了能在飞行中自动确定这6个系数,假设式(4)描述的是一个椭圆,且有

$$\begin{bmatrix} H_{xa} \\ H_{za} \end{bmatrix} = K_p_s \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_x \\ b_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $K = \begin{bmatrix} K_x & 0 \\ 0 & K_z \end{bmatrix}$; $p = \begin{bmatrix} \cos \phi_p & \sin \phi_p \\ \sin \phi_p & \cos \phi_p \end{bmatrix}$;

$$s = \begin{bmatrix} \cos \phi_s & \sin \phi_s \\ - \sin \phi_s & \cos \phi_s \end{bmatrix}。$$

即假设由 a_{xx} , a_{xz} , a_{zx} 和 a_{zz} 组成的矩阵等于对角阵 K 、对称阵 p 和正交阵 s 的乘积。正交阵将圆转了一个角度 ϕ_s ; 对称阵和对角阵使圆变成椭圆并转了一个角度; b_x 和 b_z 的作用是改变了椭圆的中心位置。如果能利用飞机飞行中采样的数据确定这个椭圆,就能求出式(4)中的系数。

让飞机在若干个航线上平飞并采样数据,每个航向上采样的数据 H_{xa} 和 H_{za} 都对应椭圆上一

点的坐标,将该椭圆用一般方程表示为

$$C_1 H_{xa}^2 + C_2 H_{za}^2 + C_3 H_{xa} H_{za} + C_4 H_{xa} + C_5 H_{za} = D^2 \quad (6)$$

式中: D 为利用采样数据对地磁场水平分量的估值。

采样数据足够多(航线数大于等于5)时,利用采样数据能求出式(6)中的未知数 C_1 , C_2 , C_3 , C_4 和 C_5 。它们与式(5)中各系数之间的关系为^[8]

$$C_1 = \frac{1}{K_x^2} \cdot \frac{1}{K_z^2}$$

$$C_2 = \frac{1}{K_x^2} \cdot \frac{1}{K_z^2}$$

$$C_3 = - \frac{1}{K_x K_z} \cdot \frac{2 \sin(2\phi_p)}{K_x K_z}$$

$$C_4 = - 2 C_1 b_x - C_3 b_y$$

$$C_5 = - C_4 b_x - 2 C_2 b_y$$

式中: 为由采样数据决定的常数。

据此可求出 ϕ_p , K_x , K_z , b_x 和 b_z , 设 $\phi_s = 0$ 可进一步求出系数 a_{xx} , a_{xz} , a_{zx} 和 a_{zz} 。根据式(4)就可以把传感器测出的有误差的 H_{xa} , H_{za} 补偿为没有误差的 H_x , H_z 。再根据式(3),可求出补偿后的航向。 ϕ_s 主要是安装误差,按椭圆假设补偿误差时,不能补偿这种常值误差。

2 椭球面假设

能在任意姿态测量磁航向的3轴磁航向系统,在飞机的竖轴 O_y 还安装有一个磁传感器 S_y , 同时由机上的垂直陀螺提供飞机的俯仰角 和倾斜角 信号。没有误差时,3个磁传感器测出的磁场分量 H_x , H_y 和 H_z 与 , 和 的关系为

$$\begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_0 \cos \\ H_0 \tan \\ - H_0 \sin \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: 为当地磁倾角;

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos & - \sin \\ 0 & \sin & \cos \end{bmatrix}; \quad = \begin{bmatrix} \cos & - \sin & 0 \\ \sin & \cos & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。$$

只要由式(7)解得 $H_0 \cos$ 和 $- H_0 \sin$, 即可按式(3)求出航向角。

有误差时,磁传感器测出的磁场分量变为 H_{xb} , H_{yb} 和 H_{zb} , 且有

$$[H_{xb} \ H_{yb} \ H_{zb}]^T = A [H_x \ H_y \ H_z]^T + B \quad (8)$$

式中: $A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$; $B = \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix}。$

显然式(7)描述一个圆球面。假设式(8)描述一个椭球面,如果能在足够多的姿态下采样传感器的输出,就能确定这个椭球面。根据椭球面的参数可求出误差系数矩阵 A 和 B。

然而,小型飞机和无人机飞行时能用于采样数据的姿态只有 3 种(平飞,左盘旋和右盘旋),且平飞时采样不方便,必须在多条航线采样。要实现空中自动罗差补偿,最理想的采样姿态是左右盘旋。但是,这两个姿态采样的数据不足以确定上述椭球面,只能确定该椭球面上的两个椭圆。利用这些数据不能实现自动补偿罗差。

3 椭圆解决方案

为了解决椭球面假设存在的问题,提出引入椭圆假设的算法,来求解式(8)中误差系数 A 和 B。

设左盘旋和右盘旋时,3 个磁传感器测出的磁场分量分别为 H_{xl}, H_{yl}, H_{zl} 和 H_{xr}, H_{yr}, H_{zr} ,将式(7)代入式(8)展开并把 H_{xl} 与 H_{yl}, H_{xl} 与 H_{zl}, H_{xr} 与 H_{yr}, H_{xr} 与 H_{zr} 两两联立可得形式上与式(4)相同的 4 个方程组:

$$\begin{bmatrix} H_{xl} \\ H_{yl} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{x0} \\ d_{y0} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} H_{xl} \\ H_{zl} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} \\ e_{21} & e_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{x0} \\ e_{z0} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} H_{xr} \\ -H_{yr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} \\ f_{21} & f_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_{x0} \\ f_{y0} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} H_{xr} \\ H_{zr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_{x0} \\ g_{z0} \end{bmatrix} \quad (12)$$

每个方程组有 6 个系数,可用椭圆假设的算法求出。这些系数既与误差系数矩阵 A, B 有关,也与 α_l 和地磁场垂直分量 H_{y0} 有关。左右盘旋时 $\alpha_l = 0$, 可利用其他方法测出, H_{y0} 可由试验数据估算。根据这些数据可得

$$A \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin \alpha_l & -\sin \alpha_r \\ 0 & \cos \alpha_l & \cos \alpha_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} + f_{11} & d_{12} & f_{12} \\ d_{21} - f_{21} & d_{22} & f_{22} \\ e_{21} + g_{21} & e_{22} & g_{22} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$2B = \begin{bmatrix} d_{x0} + f_{x0} \\ d_{y0} - f_{y0} \\ e_{z0} + g_{z0} \end{bmatrix} - A \begin{bmatrix} 0 \\ \cos \alpha_l + \cos \alpha_r \\ \sin \alpha_l + \sin \alpha_r \end{bmatrix} H_{y0} \quad (14)$$

式中: α_l 和 α_r 分别为左右盘旋时飞机的倾斜角。由式(13)和式(14)可以求出误差系数矩阵 A 和 B。

4 实验结果分析

为了验证本文方法的有效性,在地面对某无人机进行罗差补偿试验。试验中保证 $\alpha_l = 0$, 并利用经纬仪分别测出飞机的航向 α 和飞机倾斜的角度 β 。在 12 个航向上自动采样 3 轴磁航向传感器的输出数据,分别利用给定基准法^[2]和本文提出的方法进行罗差补偿。表 1 是补偿后的剩余误差,其中 α_1 为补偿前的误差; α_2 为给定基准法补偿后的剩余误差; α_3 为本文提出的方法补偿(使用平均值)后的剩余误差。

表 1 误差补偿结果对比

航向/ $^\circ$	1/ $^\circ$		2/ $^\circ$		3/ $^\circ$		4/ $^\circ$	
	右倾	左倾	右倾	左倾	右倾	左倾	右倾	左倾
0	4.2	2.4	1.7	-1.9	0.7	0.7	-0.6	-0.6
30	-4.0	-5.3	2.0	-1.1	0.2	1.6	-1.1	0.3
60	-11.2	-11.6	1.5	-0.3	0.1	2.3	-1.4	1.0
90	-15.9	-15.0	0.4	0.5	0.1	2.6	1.2	1.3
120	-16.9	-13.7	-0.6	1.2	0.5	2.4	-0.8	1.1
150	-13.4	-7.9	-1.5	1.7	0.7	1.9	-0.6	0.6
180	-5.0	0.3	-1.9	1.5	0.9	1.0	-0.4	-0.3
210	7.1	8.8	-1.8	0.8	1.3	0.3	0.0	-1.0
240	17.6	15.1	-1.3	-0.1	2.1	0.0	0.8	-1.3
270	21.5	17.4	-0.5	-1.2	2.7	-0.2	1.4	-1.5
300	19.1	15.2	0.6	-2.1	2.8	-0.3	1.5	-1.6
330	12.7	9.8	1.5	-2.3	2.1	0.1	0.8	-1.2

从表 1 可看出, α_1 最大值为 21.5 $^\circ$; α_2 最大值为 2.3 $^\circ$,且正负基本相等; α_3 最大值正负不相等,说明有常值误差(1.3 $^\circ$),除去常值误差后(表中 α_4)最大误差为 1.6 $^\circ$,优于给定基准法。

多次试验表明,常值误差主要是安装误差。本文的自动补偿方法不能补偿安装误差是因为数据采集时没有给定航向基准,这正是它能够做到低成本的原因。从另一角度看,自动补偿方法的补偿结果真正反映了传感器测量出的方向。

对于不需要做罗差补偿的应用场合,该方法也可以用于磁航向测量系统的自动校准或调试。传感器的零位误差、满度误差和 3 个轴间的正交误差分别决定了式(8)中 B 的 3 个元素、A 的主对角线元素和 A 的其他元素。利用无磁转台让传感器在左倾和右倾姿态各转 1 圈进行采样,利用本文方法可自动补偿上述 3 种误差引起的航向测量误差。

5 结 论

随着微处理器技术的发展,对智能传感器的研究越来越受到重视。智能误差补偿是重要的研究方向之一。绝大多数误差补偿和自动校准方法都需要使用标准设备测出被测量的精确值。然而,用标准设备测量无人机的航向非常困难,且费用很高。本文在没有基准的情况下,通过采样数据的相互关系实现航向测量的自动误差补偿,能较好地解决上述问题。

本文方法的实施非常方便,只需在无人机试飞左右盘旋科目时进行自动数据采集,不需要额外试验费用。由于试验是在空中进行的,不存在周围干扰磁场的影响,试验环境是最理想的,因而可获得满意的补偿效果。原理上,如果传感器安装不准确,补偿后仍存在常值误差。这正反映了传感器测出的实际方向。就磁航向测量系统而言,补偿后没有引入额外误差。

参 考 文 献

- [1] Hine A. Magnetic compasses and magnetometers[M]. London:Adam Hilger LTD,1968.
- [2] 刘诗斌,严家明,孙希仁. 无人机航向测量的罗差修正研究[J]. 航空学报,2000,21(1):78-80.
Liu S B. Yan J M. Sun X R. Magnetic deviation compensation for UAV's heading measurement[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2000,21(1):78-80. (in Chinese)
- [3] 杨新勇,黄圣国. 智能磁航向传感器的研制及误差补偿算法分析[J]. 北京航空航天大学学报,2004,30(3):244-248.
Yang X Y. Huang S G. Development of intelligent magnetic heading sensor and analysis of its error compensation algorithms[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2004,30(3):244-248. (in Chinese)
- [4] 张静,金志华,田蔚风. 无航向基准时数字式磁罗盘的自差校正[J]. 上海交通大学学报,2004,38(10):1757-1760.
Zhang J, Jin Z H, Tian W F. Deviation calibrating for digital magnetic compass without heading reference[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University,2004,38(10):1757-1760. (in Chinese)
- [5] Caruso M J. Applications of magnetic sensors for low cost compass systems[C]. Position Location and Navigation Symposium,IEEE,2000:177-184.
- [6] Fitzgibbon A, Pilu M, Fisher R B. Direct least square fitting of ellipse[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,1999,21(5):476-480.
- [7] 雷志术,张雁波. 椭圆定形曲线拟合问题若干新型算法[J]. 上海交通大学学报,2002,36(8):1210-1213.
Lei Z S,Zhang Y B. Some new algorithms for ellipse curve fitting problem[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University,2002,36(8):1210-1213. (in Chinese)
- [8] 刘诗斌,冯小毅,李宏. 基于椭圆假设的电子罗盘误差补偿方法[J]. 传感器技术,2002,21(10):28-30.
Liu S B. Feng X Y. Li H. Error compensation method for electromagnetic compass based on ellipse hypothesis[J]. Journal of Transducer Technology,2002,21(10):28-30. (in Chinese)
- [9] Jiang X Y,Cheng D C. Fitting of 3D circles and ellipses using a parameter decomposition approach[C]. Proceedings of the Fifth International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling.2005:103-109.

作者简介:



刘诗斌(1960年-)男,教授,博士。主要研究方向:微型和智能传感器,数模混合集成电路的研究与设计。

E-mail:liushibin@nwpu.edu.cn

(责任编辑:张利平)