

A Calibration Method of MEMS Gyroscope Based on Magnetic Sensor*

LIU Shibin*, CHEN Lulan, ZHANG Wei, WANG Yongbo, QIU Songsong

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

Abstract: According to the characteristics of different sensors in an Attitude and Heading Reference System (AHRS), a new calibration method of MEMS gyroscope based on the output of magnetic sensor is developed. The error models of the MEMS gyroscope is established, and appropriate compensation algorithm for MEMS gyroscope's bias error and scale factor error was designed. Compared with the traditional calibration methods, this method is rather simple and suitable for real-time calibration. Experimental results show that the static accuracy of MEMS gyroscope has reached a high accuracy, the drift of pitch angle is less than 0.035° per two minutes, the drift of tilt angle is less than 0.15° per two minutes and the drift of heading angle is less than 0.2° per two minutes. When input angle rates of all three axes are within 25°/s, the heading angle error, pitch angle error and tilt angle error are all no more than ±2°.

Key words: MEMS gyroscope; error model; error compensation; magnetic sensor; reference angular rate
EEACC: 7230; 7310L doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2013.12.015

一种基于磁传感器的 MEMS 陀螺标定方法*

刘诗斌*, 陈露兰, 张 韦, 王永波, 秋颂松

(西北工业大学电子信息学院, 西安 710072)

摘 要: 根据微型航姿测量系统各传感器的特点, 研究出了一种基于磁传感器输出的 MEMS 陀螺标定方法, 并根据 MEMS 陀螺误差参数模型设计相应的补偿算法, 分别对 MEMS 陀螺的零偏和标度因数误差进行了补偿。与传统标定方法相比, 该方法实现简单, 适用于现场标定。实验结果表明, 该标定方法能够有效地提高 MEMS 陀螺测量精度, 补偿后陀螺在静态条件下 2 min 内, 俯仰角漂移小于 0.035°, 倾斜角漂移小于 0.15°, 航向角的漂移小于 0.2°。当陀螺三轴均有角速率输入时, 在角速度小于 25°/s 情况下误差都能保持在 ±2° 以内。

关键词: MEMS 陀螺; 误差补偿; 误差模型; 磁传感器; 角速率基准

中图分类号: V241.5.33; TP212

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2013)12-1700-04

微机电系统 MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) 陀螺仪以其成本低、体积小、质量轻、功耗低、可靠性高等优点近年来迅速得到了长足发展, 但是目前 MEMS 陀螺的精度仍然很低, 限制了其进一步应用, 由提高加工工艺的精度来提高 MEMS 陀螺精度成本过高^[1-7], 因而对 MEMS 陀螺进行准确的误差建模和软件算法修正成为提高其精度的一个重要手段^[8]。

三轴 MEMS 陀螺的误差补偿主要分为确定性误差补偿和随机误差补偿。MEMS 陀螺的标度因数等确定性误差对其姿态解算精度的影响非常显著, 因此对 MEMS 陀螺的确定性误差进行标定补偿, 提高其环境适应性和测量精度^[9]是航姿系统提供正确航向姿态信息的前提^[10]。在传统的速率陀螺确定性误差标定方面, 多利用单轴^[11]或者三轴^[12]速

率转台, 采用位置标定法^[13]或速率标定法^[14]来标定补偿。本文设计了一种利用磁通门传感器的输出标定速率陀螺的方法, 该方法无需速率转台, 算法简单, 易于现场标定, 并能有效提高陀螺精度。

1 误差补偿方法

MEMS 陀螺的主要误差项包括标度因数、安装误差、常值漂移、随机噪声等^[15]。因为 MEMS 陀螺的标度因数误差和零偏误差相对较大, 其静态误差模型可简化为:

$$\begin{bmatrix} \omega_{xm} \\ \omega_{ym} \\ \omega_{zm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_x & 0 & 0 \\ 0 & N_y & 0 \\ 0 & 0 & N_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{\omega x} \\ B_{\omega y} \\ B_{\omega z} \end{bmatrix} \quad (1)$$

项目来源: 国家自然科学基金项目(60874101); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20126102110031)

收稿日期: 2013-10-01 修改日期: 2013-11-14

其中 ω_{xm} 、 ω_{ym} 、 ω_{zm} 分别为 MEMS 陀螺 X、Y、Z 轴输出角速度的测量值; ω_x 、 ω_y 、 ω_z 分别为 X、Y、Z 轴的实际输入角速度值; N_x 、 N_y 、 N_z 分别为 X、Y、Z 轴的标度因数; B_{ω_x} 、 B_{ω_y} 、 B_{ω_z} 分别为陀螺 X、Y、Z 轴的零偏误差。

将安装有三轴磁传感器和三轴速率陀螺的航姿测量系统固定在无磁转台上。当载体绕某一轴旋转时,因磁传感器在大多数情况下(该轴与当地地磁场方向不平行)都能提供正确的地磁场信息,在已知角度变化时间间隔的情况下,其输出可作为陀螺校准的速率基准。

以水平绕旋转 Z 轴为例,此时 Z 轴磁传感器的输出几乎不变,而 X 轴和 Y 轴上的磁传感器输出会发生变化,且其变化量与绕 Z 轴旋转过的角度 $\Delta\varphi$ 的关系如图 1 所示。

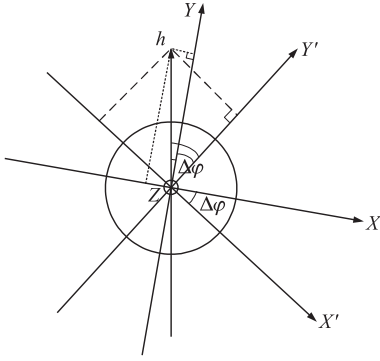


图 1 X、Y 轴磁传感器数据随 $\Delta\varphi$ 变化示意图

根据坐标旋转公式有:

$$\begin{cases} h'_x = h_x \cos\Delta\varphi - h_y \sin\Delta\varphi \\ h'_y = h_y \cos\Delta\varphi + h_x \sin\Delta\varphi \end{cases} \quad (2)$$

则可得到:

$$\Delta\varphi = \arctan\left(\frac{-h'_x h_y + h_x h'_y}{h_x h'_x + h_y h'_y}\right) \quad (3)$$

同理,载体绕 X 轴旋转和绕 Y 轴旋转时,分别是 Y 轴、Z 轴磁传感器和 X 轴、Z 轴磁传感器的输出数据发生变化,根据坐标旋转公式,其变化量与载体的旋转角度 $\Delta\theta$ 、 $\Delta\gamma$ 的关系分别如式(4)、(5)所示:

$$\Delta\theta = \arctan\left(\frac{h'_y h_z - h_y h'_z}{h_y h'_y + h_z h'_z}\right) \quad (4)$$

$$\Delta\gamma = \arctan\left(\frac{-h'_x h_z + h_x h'_z}{h_x h'_x + h_z h'_z}\right) \quad (5)$$

由式(3)~式(5)得到载体绕某一轴旋转的角度变化量。选取采集两次航向角变化的时间间隔为旋转时间差 T_s 。则由磁传感器获得的速率基准分别为

$$\omega_x = \Delta\theta/T_s, \omega_y = \Delta\gamma/T_s, \omega_z = \Delta\varphi/T_s \quad (6)$$

利用递推最小二乘法拟合式(1),分别求得陀螺 3 个轴的标度因数与零偏误差。因此只需要保持载体绕单轴旋转运动一段时间,即可得到该轴相应

的误差参数。

2 实验验证

在室温条件下,整个实验过程在 3SK-150 型无磁转台(分辨率 0.02°)上进行,航姿测量系统被安装在无磁转台上。该系统的惯性传感器采用意法半导体公司生产的 MEMS 三轴加速度计 LIS331DLH^[16] 和三轴角速率陀螺 L3G4200D^[17],磁传感器采用课题组自行设计制作的三轴磁通门传感器,使用文献[18]所述标定方法补偿后的磁传感器误差在 $\pm 0.25^\circ$ 之间,在知道各数据间时间间隔的情况下,可以用此数据作为角速度标准。在一次上电过程中,将载体分别绕 X 轴、Y 轴和 Z 轴缓慢旋转,采集航姿系统输出的航向姿态角信息以及磁传感器与陀螺的输出数据,利用递推最小二乘法计算得到陀螺三轴的标度因数和零偏分别为:

$$\begin{cases} N_x = 1.198 0 & B_{\omega_x} = 0.004 0 \\ N_y = 1.240 0 & B_{\omega_y} = 0.000 45 \\ N_z = 1.219 8 & B_{\omega_z} = 0.000 5 \end{cases}$$

对陀螺输出进行补偿,代入四元数进行姿态更新。下面对不同情况下的补偿效果进行分析:

(1) 固定 $\theta = 0^\circ$ 、 $\gamma = 0^\circ$ 、 $\varphi = 0.7^\circ$,保持静止大约 2 min,整个过程中,俯仰角和倾斜角误差均未补偿前的 5.6° 左右分别减小为 $\pm 0.035^\circ$ 和 $\pm 0.15^\circ$,航向角误差从未补偿前的约 3.5° 减小为 ± 0.2 以内 $^\circ$ 。图 2 与图 3 显示了静止条件下航向角的补偿效果。

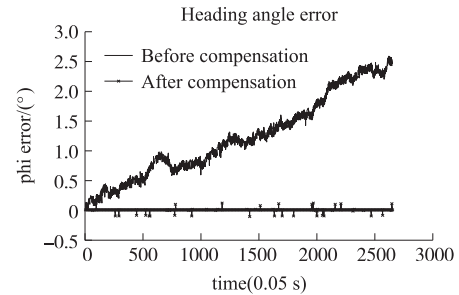


图 2 静止条件下补偿前后的航向角误差

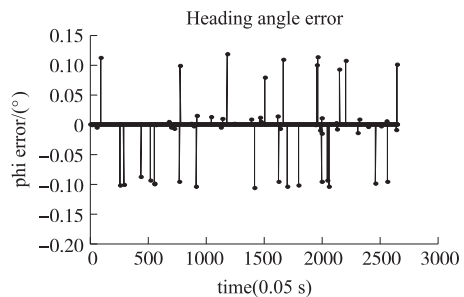


图 3 静止条件下补偿后载体的航向角误差

(2) 固定 $\theta = 0^\circ$ 、 $\gamma = 0^\circ$ 、 φ 从 0° 缓慢连续旋转至 45° 并静止,计算得平均旋转角速率为 $3^\circ/\text{s}$ 。此时航

向跟踪效果如图3所示。

在动态条件下,引起陀螺漂移的主要因素是标度因数误差,在陀螺绕Z轴旋转45°过程中,未补偿时误差达到了8°,而补偿后的数据基本能跟踪正确的角度值,且补偿后陀螺的误差保持在±0.5°内,达到了较高的精度,如图5所示。

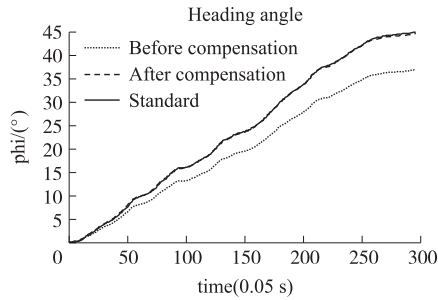


图4 载体绕Z轴旋转时航向角跟踪效果

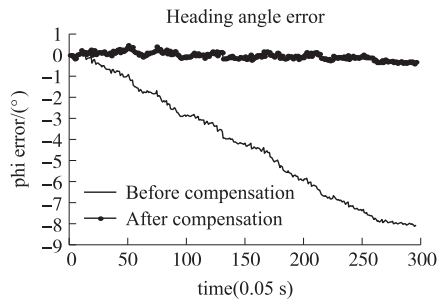


图5 载体绕Z轴旋转时航向角补偿效果

(3)在载体同时绕3个轴缓慢转动的情况下, θ 、 γ 、 φ 分别从0°~28.7°,0.1°~31.1°,1.5°~38.8°缓慢变化,平均角速率分别为2°/s、2°/s、2.5°/s,补偿前后角度跟踪情况如图6所示,补偿后角度误差如图7所示。

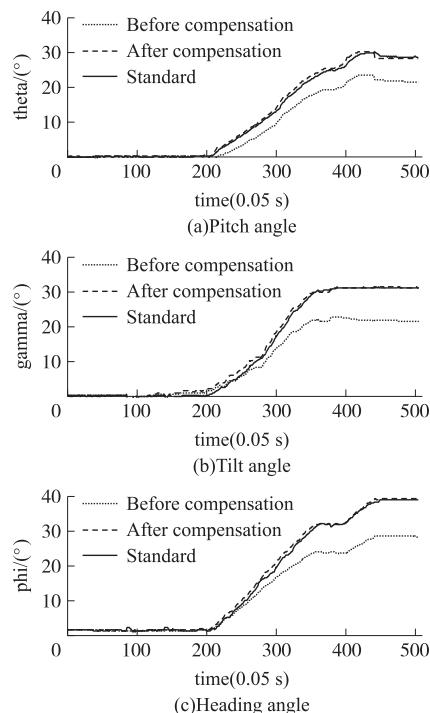


图6 载体补偿前后航向姿态角度跟踪情况

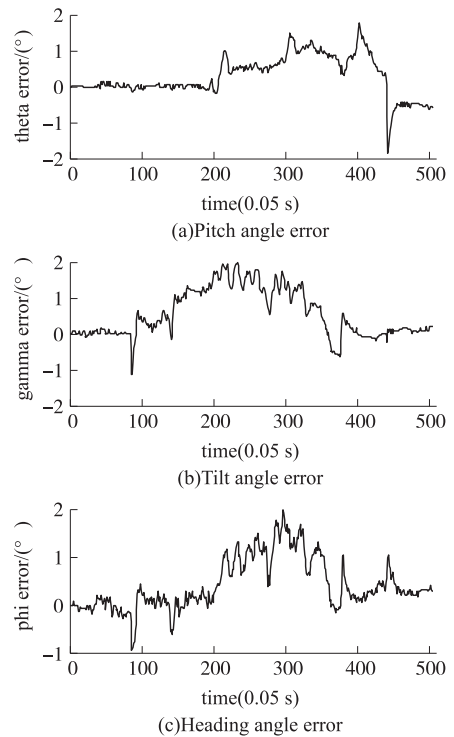


图7 补偿后航向姿态角误差

可见上述补偿方法能起到较好的效果,使得系统测量的俯仰角、倾斜角和航向角误差均从补偿前的10°左右降至±2°以内。

3 结论

本文以磁传感器的输出为MEMS陀螺的标定提供速率基准,完成了MEMS陀螺的零偏和标度因数误差补偿,在当地地磁场方向与陀螺的旋转轴不平行时,此方法即可行。补偿后静态条件下陀螺精度为2 min 漂移在±0.2°以内,动态条件下陀螺的精度从未补偿时缓慢连续运动15 s有8°左右误差减小为±0.5°。但是陀螺的在动态条件下的精度与输入角速度相关,经反复试验,角速度小于25°/s时,误差能保持在±2°以内,载体输入角速度比较大时,安装误差对补偿效果会产生较大影响,后续工作可将其列入误差模型中。本文所述标定方法利用系统自身的输出为作为基准,实现条件容易,算法简单,易于工程实施。

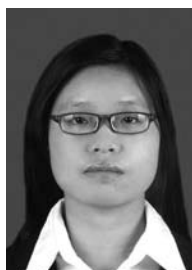
参考文献:

- [1] 李轶,段风阳,周维杰,等. 微机械陀螺随机误差补偿研究[J]. 舰船电子工程,2011,(09):54-56.
- [2] 翁海论,任春华,张敬栋,等. 基于最小分辨率的MEMS陀螺漂移抑制方法研究[J]. 仪器仪表学报,2011,(10):2371-2375.
- [3] 李长森,郭海雷,谷岩,等. MEMS微惯性组合静态误差建模与补偿[J]. 微纳电子技术,2012,(1):50-55.

- [4] 宋吉磊,吴训忠,郭铃. 微机电系统陀螺仪随机漂移误差建模与滤波研究[J]. 导弹与航天运载技术,2012(4):35-38.
- [5] 蒙涛,王昊,李辉,等. MEMS 陀螺误差建模与滤波方法[J]. 系统工程与电子技术,2009(8):1944-1948.
- [6] 张海鹏,房建成. MEMS 陀螺仪短时漂移特性实验研究[J]. 中国惯性技术学报,2007(1):100-104.
- [7] 张宇辛,卞鸿巍,朱涛. MEMS 陀螺随机误差的实验测试分析[J]. 舰船电子工程,2013,(5):140-142.
- [8] 吕印新,肖前贵,杨柳庆. MEMS 陀螺随机误差建模与补偿[J]. 电子测量技术,2012(12):41-45.
- [9] Zhang Lundong, Lian Junxiang, Wu Meiping, et al. Research on Auto Compensation Technique of Strap-Down Inertial Navigation Systems[C]//Information in Control, Automation and Robotics. Bangkok:[s. n.]. 2009:350-353.
- [10] 张殿坤,季海波,谢晓阳,等. MEMS 惯组陀螺零位在线快速标定系统设计与实现[J]. 战术导弹技术,2012(2):80-84.
- [11] 李建利,房建成,马艳海,等. INS 全温六方位速率标定及分段线性插值补偿[J]. 北京航空航天大学学报,2012(10):1331-1335.
- [12] 李杰,洪惠惠,张文栋. MEMS 微惯性测量组合标定技术研究[J]. 传感技术学报,2008(7):1169-1173.
- [13] 任剡,房建成,许端,等. 光纤陀螺 IMU 全温三方位速率/一位位置标定及分段线性插值补偿方法[J]. 中国惯性技术学报,2013(1):51-55.
- [14] He Guanglin, Tao Siqian, SHEN Qiang, et al. Research on Calibration and Parameter Compensation of MEMS Inertial Sensors Based on Error Analysis [C]//International Symposium on Computation Intelligence and Design. 2012:325-329.
- [15] 彭孝东,陈瑜,李继宇,等. MEMS 三轴数字陀螺仪标定方法研究[J]. 传感器与微系统,2013(6):63-65,69.
- [16] ST Corp. LIS331DLH MEMS Digital Output Motion Sensor: Ultra Low-Power High Performance 3-Axes Nano Accelerometer [EB/OL]. 2009.
- [17] ST Corp. L3G4200D MEMS Motion Sensor: Ultra-Stable Three-Axis Digital Output Gyroscope [EB/OL]. 2010.
- [18] 张韦,刘诗斌,冯文光,等. 基于磁通门的三轴电子罗盘自动误差补偿方法[J]. 传感技术学报,2012(12):1692-1695.



刘诗斌(1960-),男,河南巩义市人,西北工业大学电子信息学院教授,博士生导师。长期从事无人机传感器系统的研究,研究方向为磁场和压力测量,智能传感器系统,微电子和计算机应用,liushibin@nwpu.edu.cn;



陈露兰(1989-),女,湖北荆州人,西北工业大学电子信息学院硕士研究生,研究方向为智能传感器,1379345823@qq.com。