

## 惯性系统中加速度计标定方法研究

陈 剑, 孙金海, 李金海, 阎跃鹏

(中国科学院 微电子研究所, 北京 100029)

**摘 要:** 在惯性导航系统中, 传统的加速度计标定方法有些对转台依赖性比较高, 对转台无依赖性的方法精度又比较低. 对此, 提出一种无需转台的加速度计高精度标定方法. 该方法只需要采集十二个位置的静态加速度计输出数据, 即可对加速度计零偏、标度因数、安装误差等系数进行高精度标定. 实验结果证明, 该方法与传统无转台加速度计标定方法相比, 具有更高的精度.

**关键词:** 加速度计; 标定; 惯性导航系统; 微机电系统

**中图分类号:** U666.12+2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-7180(2012)08-0130-04

## The Research of Calibration Method of Accelerator in Inertial Navigation System

CHEN Jian, SUN Jin-hai, LI Jin-hai YAN Yue-peng

(Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China)

**Abstract:** In inertial navigation system, some traditional calibration methods of accelerator mainly rely on turntable, other methods without the support of turntable have less accuracy. Therefore, this paper presents a high-accuracy calibration method of accelerator without the support of turntable. It only needs 12 static output data of accelerator to calibrate the bias, scale factor and misalignment. Experiment results indicate that this method has higher accuracy compared with traditional calibration method without the support of turntable.

**Key words:** accelerometer; calibration; Inertial Navigation System; MEMS

### 1 引言

在各种导航技术中, 基于 MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) 的低成本惯性导航系统由于其体积小、重量轻、成本低、不受外界干扰、输出频率高等优点, 应用范围越来越广. 然而, MEMS 惯性导航系统有一个致命的缺点, 其长期稳定性较差, 存在明显的时漂现象. 因此在使用前必须对 IMU 中各个传感器的误差系数进行标定.

关于加速度计的标定方法, 文献[1]提出一种 6 位置 24 点的静态标定方法, 该方法无需转台、计算量低, 但是实际操作的时候很难保证每个位置的四个点都垂直正交, 因此标定结果的精度也不能保证; 文献[2]在文献[1]的基础上提出了一种改进的动静

结合的 IMU 高精度标定方法, 提高了标定的精度, 但是该方法需要精密转台的支持, 由于实验条件的限制, 在没有转台的情况下, 无法应用该方法进行精确标定; 文献[3]提出了一种 26 位置的静态标定方法, 并且标定过程中不需要调平, 但是该方法求解过于繁琐, 实际应用中受到限制; 文献[4]提出了一种 6 位置加速度计标定方法, 该方法简单、可行性高、无需转台, 但是该方法的精度较低. 这些方法中, 有些需要的硬件条件比较高 (如需要高精度转台)、有些方法计算过于复杂、有些方法精度比较低, 都难以满足实际应用.

针对上述问题, 本文提出一种无需转台的加速度计高精度标定方法, 该方法结合两种不同的加速度计模型对加速度计进行标定, 首先通过一般模型

收稿日期: 2012-01-09; 修回日期: 2012-03-02

基金项目: 国家高科技研究发展计划(2009AA12Z314)

求出加速度计各个标定误差系数项的粗略值,然后通过精确模型对各个系数进行微调,最终达到预设的精度.该方法计算简单,操作性高,可以在现场没有转台的情况下对加速度计进行标定,实验验证结果表明,该方法具有较高的精度.

## 2 加速度计粗标定

### 2.1 粗标定模型

对加速度计进行标定,首先需要对加速度计建立数学模型,一般来说,对加速度计进行建模需要考虑加速度计的零偏和标度因数等系数.在惯性系统中,加速度计已经安装在系统中,并且需要将三个轴向的加速度计进行整体标定,这时候需要将安装误差考虑进来.因此,对于惯性系统加速度计的标定模型,需要综合考虑零偏、标度因数和安装误差等因素.

加速度计粗标定的模型如下所示:

$$A_x = B_x + S_x V_x + E_{xy} V_y + E_{xz} V_z$$

$$A_y = B_y + E_{yx} V_x + S_y V_y + E_{yz} V_z$$

$$A_z = B_z + E_{zx} V_x + E_{zy} V_y + S_z V_z$$

式中,  $A_i$  ( $i=x, y, z$ ) 为  $x, y, z$  轴实际的加速度值,  $B_i$  ( $i=x, y, z$ ) 为各个轴上加速度计的零偏,  $S_i$  ( $i=x, y, z$ ) 为各轴加速度计的标度因数,  $V_i$  ( $i=x, y, z$ ) 为各轴加速度计输出的电压值,  $E_{ij}$  ( $i=x, y, z, j=x, y, z, i \neq j$ ) 为加速度计的安装误差系数.

### 2.2 粗标定方法

粗标定方法采用六位置静态标定方法,即在水平桌面上,将  $X, Y, Z$  轴分别向上、向下共六个位置,每个位置采集静态数据,将每个位置各加速度计输出电压的均值作为该加速度计的测量值进行后期的解算.

六位置加速度计标定方法的具体步骤如下:

(1) 将惯性导航系统放在水平桌面上,使系统的  $X$  轴垂直桌面向上,  $Y$  轴和  $Z$  轴处于水平桌面内.

(2) 采集系统静止过程中三个轴向上加速度计的输出电压 3~5 分钟,并对每个加速度计输出的采样电压求平均;

(3) 将系统的  $X$  轴垂直桌面向下,  $Y$  轴和  $Z$  轴处于水平桌面内,重复(2);

(4) 将系统的  $Y$  轴垂直桌面向上,  $X$  轴和  $Z$  轴处于水平桌面内,重复(2);

(5) 将系统的  $Y$  轴垂直桌面向下,  $X$  轴和  $Z$  轴处于水平桌面内,重复(2);

(6) 将系统的  $Z$  轴垂直桌面向上,  $X$  轴和  $Y$  轴处于水平桌面内,重复(2);

(7) 将系统的  $Z$  轴垂直桌面向下,  $X$  轴和  $Y$  轴处于水平桌面内,重复(2);

(8) 利用 6 个位置上的 6 组数据,根据加速度计的误差模型,采用误差模型系数计算公式计算出加速度计误差模型的各项系数.

当 AHRS 的静止并且  $X$  轴向上的过程中,加速度计的误差方程如下:

$$g = B_x + S_x V_{x1} + E_{xy} V_{y1} + E_{xz} V_{z1}$$

$$0 = B_y + E_{yx} V_{x1} + S_y V_{y1} + E_{yz} V_{z1}$$

$$0 = B_z + E_{zx} V_{x1} + E_{zy} V_{y1} + S_z V_{z1}$$

式中的下标“1”表示第 1 个位置,即  $X$  轴垂直桌面向上.对于第 2~6 个位置( $X$  轴向下、 $Y$  轴向上、 $Y$  轴向下、 $Z$  轴向上以及  $Z$  轴向下 5 个位置),根据上述方法,每个位置可建立 3 个方程,这样对于每个加速度计来说,一共有四个未知的模型参数,但是有 6 个方程,因此可以利用最小二乘法解出系数项,求解如下:

$$\begin{bmatrix} B_x \\ S_x \\ E_{xy} \\ E_{xz} \end{bmatrix} = (G^T G)^{-1} G^T \begin{bmatrix} g \\ -g \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} B_y \\ E_{yx} \\ S_y \\ E_{yz} \end{bmatrix} =$$

$$(G^T G)^{-1} G^T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \\ -g \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} B_z \\ E_{zx} \\ E_{zy} \\ S_z \end{bmatrix} = (G^T G)^{-1} G^T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ g \\ -g \end{bmatrix}$$

其中,

$$G = \begin{bmatrix} 1 & V_{x1} & V_{y1} & V_{z1} \\ 1 & V_{x2} & V_{y2} & V_{z2} \\ 1 & V_{x3} & V_{y3} & V_{z3} \\ 1 & V_{x4} & V_{y4} & V_{z4} \\ 1 & V_{x5} & V_{y5} & V_{z5} \\ 1 & V_{x6} & V_{y6} & V_{z6} \end{bmatrix}.$$

由于桌面并非标准的水平面,系统放置的时候也不是严格地将  $X, Y, Z$  轴垂直向上或者向下,所以这里求出来的各项系数必然有一定的误差.因此,需要用加速度计的精确标定模型修正这里求出来的粗略解.

### 3 加速度计精确标定

#### 3.1 精确标定模型

加速度计的精确标定模型如下:

$$g^2 = A_x^2 + A_y^2 + A_z^2 = (B_x + S_x V_x + E_{xy} V_y + E_{xz} V_z)^2 + (B_y + E_{yx} V_x + S_y V_y + E_{yz} V_z)^2 + (B_z + E_{zx} V_x + E_{zy} V_y + S_z V_z)^2$$

式中,  $A_x, A_y, A_z$  为相应轴向的加速度,  $g$  是当地的重力加速度,  $B_i (i=x, y, z)$  分别是对应轴向加速度计的零偏,  $S_i (i=x, y, z)$  分别是相应轴向加速度计的标度因数,  $E_{ij} (i, j=x, y, z \text{ 且 } i \neq j)$  分别是加速度计的安装误差;  $V_i (i=x, y, z)$  分别是对应轴向的输出的电压的均值。

$$f_1 = (B_x + S_x V_{x1} + E_{xy} V_{y1} + E_{xz} V_{z1})^2 + \dots + (B_z + E_{zx} V_{x1} + E_{zy} V_{y1} + S_z V_{z1})^2 - g^2 = 0$$

$$\vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots$$

$$f_{12} = (B_x + S_x V_{x12} + E_{xy} V_{y12} + E_{xz} V_{z12})^2 + \dots + (B_z + E_{zx} V_{x12} + E_{zy} V_{y12} + S_z V_{z12})^2 - g^2 = 0$$

由于方程式非线性的, 这里选用牛顿迭代法来求解, 用粗标定方法求解的系数作为这里牛顿迭代

$$f_1 = f_1(B_{x0}, \dots, S_{z0}) + \frac{\partial f_1}{\partial B_x} \Big|_{B_{x0}} (B_x - B_{x0}) + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial S_z} \Big|_{S_{z0}} (S_z - S_{z0}) = 0$$

$$\vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots$$

$$f_{12} = f_{12}(B_{x0}, \dots, S_{z0}) + \frac{\partial f_{12}}{\partial B_x} \Big|_{B_{x0}} (B_x - B_{x0}) + \dots + \frac{\partial f_{12}}{\partial S_z} \Big|_{S_{z0}} (S_z - S_{z0}) = 0$$

利用该方程不断进行迭代, 逐渐向最优值靠近, 最终将系数误差控制在指定的范围内。由于数据采集的过程中存在噪声干扰, 所以为了减小噪声对最终标定系数精度的影响, 可以在每个位置采集尽可能长时间的数据, 然后求平均, 或者选取更多的位置, 迭代的过程中利用最小二乘法来求解系数。

#### 4 实验验证及分析

这里用市场上一款成熟的 MTi 产品对本文的标定方法进行验证, 首先按一般标定方法对加速度计进行标定(即本文中的粗标定方法), 然后用本文中的方法进行标定, 得到两组标定系数。在无转台的情况下, 为了验证方法的有效性, 选取一个任意的位置, 采集加速度计输出数据, 然后分别用两组标定系数对加速度计输出进行标定, 标定以后求出两者各自的合加速度。理论上来说, 在静态条件下, 合加速度应该等于当地的重力加速度, 这里讲这两种方法计算出来的合加速度与当地的重力加速度进行对比, 验证两种方法的精确度。

用这两种算法得到的各项系数如表 1 所示。

#### 3.2 精确标定方法

对于精确标定, 一共有 12 个待求解的误差系数项, 每个位置可以建立一个方程, 因此对于 12 个系数的求解需要 12 个方程即需要选取 12 个位置。理论上, 这 12 个位置可以任意选取, 但是为了使求解的系数具有更高的精度, 这里 12 个位置选取的原则是: 每两个位置相差越大越好。

在粗标定中已经获得了 6 个位置的数据, 这里再选取剩下的 6 个位置: XY 平面、YZ 平面、XZ 平面分别与水平面成  $45^\circ$ 、 $135^\circ$  角时的 6 个位置。当前  $45^\circ$ 、 $135^\circ$  不需要非常精确。

利用这 12 组数据, 可以得到 12 个方程, 如下:

法的初始值, 然后对每个方程在初始值处进行一阶泰勒展开, 如下:

表 1 两种方法标定系数对比

		普通方法	高精度方法
零偏	X	33 094.647 337	33 086.641 274
	Y	33 394.094 447	33 390.333 418
	Z	32 641.239 753	32 648.679 799
标度因数	X	409.675 030	409.675 030
	Y	411.752 659	411.752 659
	Z	412.014 478	412.014 478
安装误差	XY	1.959 567	1.959 567
	XZ	-1.561 722	-1.561 722
	YX	-1.274 475	-1.274 475
	YZ	0.278 138	0.278 138
	ZX	5.723 103	5.723 103
	ZY	9.353 853	9.353 853

重新采集数据, 对两种标定方法的验证结果如图 1 所示: 是任意选取一个静态位置, 将加速度计输出结果经过两种方法标定以后得到的加速度减去实际加速度以后得到的误差。从图中可以看出, 经过本文中

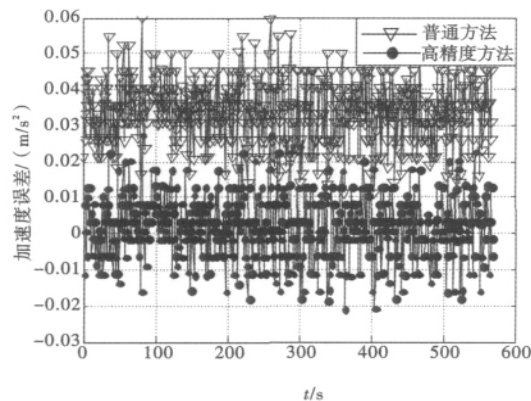


图 1 两种方法加速度计输出误差对比

精确标定方法标定以后,得到的加速度与实际加速度值更接近,并且抖动范围也比较小,充分证明了本文标定方法的有效性。再对比表中两种方法的系数可以知道,本次标定,高精度标定方法主要是对粗略标定的零偏进行修正,两种方法的其它系数项基本相同。

## 5 结束语

本文分析了现有标定方法的优缺点,并针对已有标定方法的不足给出了一种无需转台的高精度标定方法。该方法应用两种加速度计模型先进行粗略标定,以粗标定结果作为精确标定的初始值进行迭代,最终求解出加速度计系数的精确值。

(上接第 129 页)

系统。在今后的研究中,可通过多测试不同的混沌系统的随机性、安全性等等,致力于研究和开发更具有安全实用的数码防伪系统。

## 参考文献:

- [1] 徐大雄. 列入中华人民共和国国家标准的 10 项防伪技术[J]. 激光杂志, 1999, 10(4): 1-5.
- [2] 盛苏英, 吴新华. 一种新的图像加密算法研究与应用[J]. 微电子学与计算机, 2011, 28(2): 124-128.
- [3] 孙嫻, 赵东风, 丁洪伟. 扩展 Logistic 混沌序列性能分析[J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2007(2), 136-139.
- [4] 赵芮. 基于二维 logistic 与 chebyshev 映射的 AES 的混沌加密算法[D]. 山西: 太原理工大学, 2008.
- [5] Zhang Han, Wang Xiu Feng. A new image encryption algorithm based on chaos system[C]// Proceedings of the International Conference on Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing. China, ChangSha;

## 参考文献:

- [1] 陈北欧、孙文胜. 捷联组合(设备无定向)六位置测试标定[J]. 导弹与航天运载技术, 2001(3): 23-27.
- [2] 刘百奇、房建成. 一种改进的 IMU 无定向动静混合高精度标定方法 [J]. 仪器仪表学报, 2008(6): 1250-1254.
- [3] Syed Z F, Aggarwal P, Goodall C, et al A new multi-position calibration method for MEMS inertial navigation systems[J]. Measurement Science And Technology, 2007, 18(7): 1987-1907.
- [4] 张红宇、叶新生. 一种改进的 IMU 加表标定模型及快速标定方法 [J]. 理论与实践, 2009(3): 11-13.
- [5] 吕晶晶, 姚金杰. 基于最小二乘和牛顿迭代法的空中目标定位 [J]. 微电子学与计算机, 2011(9), 108-110.
- [6] 何坤鹏、吴俊伟. 光纤捷联惯性测量组件在无安装基准时标定方法 [J]. 北京理工大学学报, 2009(3): 219-223.
- [7] John J Hall, Robert L Williams. Inertial measurement unit calibration platform [J] Journal of Robotic Systems, 2000, 17(11): 623-632.
- [8] 温银萍, 温廷敦. 介观压阻型硅锗加速度计研究 [J]. 微电子学与计算机, 2009(3): 22-25.

## 作者简介:

陈 剑 男, (1986-), 硕士研究生. 研究方向为组合导航算法.

IEEE, 2003: 778-782.

- [6] 张雪峰, 范九伦. 改进的混沌序列产生方法[J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(3): 600-601.
- [7] 李长庚, 周家令, 孙克辉, 等. 四种数字混沌扩频序列的平衡性分析[J]. 计算机应用, 2008, 28(1): 68-70.
- [8] 刘成斌. 混沌加密算法的研究与实现[D]. 北京: 邮电大学, 2009.
- [9] 张颖. 基于数字混沌的密钥系统设计及应用研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2010.

## 作者简介:

魏 旭 男, (1988-), 硕士研究生. 研究方向为混沌加密技术与保密通信.

陆国平 男, (1965-), 教授, 博士生导师. 研究方向为非线性信号处理、智能控制、鲁棒控制研究.

陈秋琼 女, (1987-), 硕士研究生. 研究方向为混沌图像加密技术.

论文发表、论文降重、论文润色请扫码



免费论文查重，传递门 >> <http://free.paperyy.com>

阅读此文的还阅读了：

- [1. 惯性导航系统中加速度计标定方案设计与研究](#)
- [2. 一种六加速度计无陀螺惯性导航系统安装误差校准方法研究](#)
- [3. 过定位空气静压轴承装配时上/下轴套的调整](#)
- [4. 便携式汽车运动参数综合测试系统研究](#)
- [5. 无依托状态加速度计的新型标定方法](#)
- [6. 基于双轴位置转台的光纤陀螺惯组标定方法](#)
- [7. 微惯性测量器件的标定方法研究](#)
- [8. 加速度计高阶误差模型系数的标定方法](#)
- [9. 无陀螺系统构型安装误差标定及补偿方案分析](#)
- [10. 机抖激光陀螺捷联惯性组合中加速度计的标定方法研究](#)
- [11. 基于迭代计算的加速度计标定方法](#)
- [12. 线性神经网络在加速度计静态模型标定的应用](#)
- [13. 一种新的无陀螺惯性测量组合标定方法](#)
- [14. 用于末敏弹稳态扫描参数测量的微惯性测量单元的误差标定](#)
- [15. 无陀螺系统构型安装误差标定及补偿方案分析](#)