文章编号:1004-2474(2018)04-0589-05

MEMS 加速度计混合误差标定补偿方案

刘 宇,余 跃,路永乐,邸 克,郭俊启

(重庆邮电大学光电信息感测与传输技术重庆市重点实验室,重庆400065)

摘 要:针对微机电系统(MEMS)加速度计在实际使用过程中存在非正交零偏误差和温度漂移误差的问题, 提出了一种混合误差标定补偿算法。算法通过分析加速度计温度与误差的关系,在不同温度区间下建立加速度计 输出的误差模型,在每个温度区间采用十二位置校准法对加速度计的非正交零偏误差进行标定补偿,得到精确的 零偏和刻度因子,同时采用最小二乘法拟合零偏和刻度因子与温度的一维关系函数,最终实现不同温度区间下的 动态误差补偿。实验结果表明,本算法可使加速度计输出的精度提高1个数量级,补偿效果明显。

A Mixing Error Calibration and Compensation Scheme for MEMS Accelerometer

LIU Yu, YU Yue, LU Yongle, DI Ke, GUO Junqi

(Chongqing Municipal Lelvel Key Lab. of Photoelectronic Information Sensing and Transmitting Technology,

Chongqing University of Post and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Aiming at the problems of non-orthogonal zero bias error and temperature drift error in the practical use of MEMS accelerometer, a hybrid error calibration compensation algorithm was proposed in this paper. By analyzing the relationship between the accelerometer temperature and error, the error model of the accelerometer output at different temperature intervals was established. The 12-position calibration method was used to calibrate and compensate the non-orthogonal zero bias error of the accelerometer in each temperature interval to obtain accurate zero bias and scale factor. At the same time, the least squares method was used to fit the one-dimensional relationship function among the zero bias and scale factor and temperature, and finally the dynamic error compensation under different temperature ranges was realized. The experimental results show that the proposed algorithm can increase the accuracy of the accelerometer output by one order of magnitude, and the compensation effect is obvious.

Key words: MEMS accelerometer; 12-position calibration; least squares method; temperature interval; dynamic error compensation

0 引言

微机电系统(MEMS)惯性器件因其体积小,质 量小,功耗低,可大批量生产,成本低及可靠性高等 一系列传统传感器所没有的优点,被广泛应用于航 空、航海、地质、汽车工业、机器人及消费类电子产品 等领域^[1]。而 MEMS 加速度计作为惯性测量单元 的核心器件之一,其性能的优劣程度直接决定了惯 性导航系统的导航精度。因此,有必要通过建立相 应误差模型对加速度计输出进行标定补偿^[2-4]。

国内、外学者对加速度计误差的标定和补偿均 有相应的研究。文献[5]提出无需定向安置测试设 备的六位置 24 点法,计算量小,但在实际应用过程 中不易保持 x、y、z 轴在 6 个状态下 4 个采样点都正 交,很难保证稳定精度;文献[6]提出一种新型不同 位置标定法,该方法不需要对惯性传感器进行特殊 的安装和对准,但是该方法过程复杂。文献[7]采用 基于 LM 算法的 BP 神经网络建立了加速度计温度 补偿模型,但需要提前对神经网络进行训练。文献 [8]通过数学拟合法建立加速度计温度辨识模型,但 仅消除了温度变化对加速度计输出的影响。

本文提出了一种混合误差标定补偿算法。在各 个温度区间下建立加速度计输出的误差模型,在每 个温度区间采用十二位置法对加速度计进行标定补

收稿日期:2017-08-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61301124,61471075,61671091);重庆市科委基础研究基金资助项目(cstc2014jcyjA1350);重庆邮 电大学博士启动基金资助项目(A2015-40);重庆科委自然科学基金资助项目(cstc2016jcyjA0347)

作者简介:刘宇(1972-),男,四川宜宾人,教授,硕士生导师,博士,主要从事传感器件与系统的研究。E-mail:496101744@qq.com。

偿,得到精确的零偏和刻度因子;同时,采用最小二 乘法实现零偏和刻度因子与温度关系的一阶拟合, 实现不同温度区间下的动态误差补偿。通过设计实 验进行验证,结果表明,在标定补偿前、后的加速度 计输出的标准差分别为 53.25 mg(g=9.8 m/s²)和 5.46 mg。输出精度提高了 1 个数量级,补偿效果 明显。

1 方法原理

1.1 MEMS 加速度计的数学模型

加速度计的误差来源主要有零偏、标度因数、安装误差、二次项误差等^[9-11],其中二次项误差对加速度计影响较小,故本算法不考虑该误差项。建立加速度计误差模型为

$$\begin{bmatrix} A_{x} - a_{x0} \\ A_{y} - a_{y0} \\ A_{z} - a_{z0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{x} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{y} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{x} \\ a_{y} \\ a_{z} \end{bmatrix}$$
(1)

式中: A_x 、 A_y 、 A_z 分别为加速度传感器的 x, y, z 轴 实际测量值; a_{i0} (i = x, y, z)是 MEMS 加速度计的 零偏值; k_i (i = x, y, z)为 MEMS 加速度计三轴刻 度因子; k_{ij} (i, j = x, y, z)为轴间干扰。其中, a_{i0} 和 k_i 的值会随温度变化,但在对应温度区间下近似为 固定值。

1.2 MEMS 加速度计十二位置标定方案

本文提出的十二位置校准法中 MEMS 加速度 计翻转的各个位置如图 1 所示。使用的 SGT-8T 型 三轴温控转台如图 2 所示。本文设计的校准方案选 取 12 个位置的取向以及每个轴的重力加速度值如 表 1 所示。





2.1 十二位置法求解零偏和刻度因子

2.1.1 标定流程

加速度计十二位置法标定流程为:

1) 将 MEMS 姿态仪固定在三轴温控转台的中 心位置,保持加速度计的 z 轴垂直于转台的水平面。



图 2 三轴温控转台

表1 十二位置取向与对应的重力加速度值

位置	坐标轴取向			重力加速度值/g		
	z 轴	y 轴	x 轴	z 轴	ソ轴	x 轴
1	天	东	南	-1	0	0
2	南	东	地	0	0	1
3	地	东	北	1	0	0
4	北	东	天	0	0	-1
5	南	天	东	0	-1	0
6	地	南	东	1	0	0
7	北	地	东	0	1	0
8	天	北	东	-1	0	0
9	东	南	天	0	0	-1
10	东	地	南	0	1	0
11	东	北	地	0	0	1
12	东	天	北	0	-1	0

1.3 最小二乘法温度拟合

最小二乘法拟合是根据偏差平方和最小的原理 来选取拟合函数关系曲线^[12]。对加速度计进行温 度建模的实质就是确定加速度计零偏 *a*₀ 和刻度因 子 *k*₀ 与温度的函数关系。本文构建的温度与零偏 和刻度因子的关系由下式表示,再通过最小二乘法 对其进行一次拟合,解出系数。

$$a_0 = a_{00} + a_{01}T \tag{2}$$

$$k_0 = k_{00} + k_{01} T \tag{3}$$

式中:T为环境温度;a00、a01、k00、k01为一次拟合相关的系数。通过拟合不同温度区间下的零偏和刻度因子的值即可建立全温度范围内的加速度计误差模型。

2018 年

2) 给姿态仪供电,预热 10 min,使其进入稳定 状态,设定对应温度区间后操控转台,使得 z 轴分别 转过 0°、90°、180°、270°,转动期间实时采集惯性测 量单元(IMU)输出的数据,采样频率设置为 50 Hz, 每个位置点静态采集 40 s。

3) 调整转台位置,操控转台,使得 y、x 轴分别 在 0°、90°、180°、270°的4个位置点的加速度计输出 电压值。

4)整理采集的加速度计输出测量值,根据12 个翻转位置点的加速度计输出测量值计算出加速度 计的刻度因子、零位、安装误差等参数。

5) 将零位、刻度因子、安装误差等参数代入加 速度计误差模型,实现标定。

2.1.2 参数求解

根据上面描述的输出模型,以*x、y、z*轴分别在 0°、180°的6个位置(即位置1、3、5、7、9、11)的加速 度计电压输出作为误差模型输入,可以获得第一组 误差系数。

x 轴的输出数据可记为

$$|A_{z6_1} = a_{z0_1} + k_{zx}|$$

根据式(4)~(6)可得一组加速度传感器 x、y、z 轴的误差模型的系数为

$$\begin{cases} a_{x_{0_{1}}} = \frac{A_{x_{1_{1}}} + A_{x_{2_{1}}} + A_{x_{3_{1}}} + A_{x_{4_{1}}} + A_{x_{5_{1}}} + A_{x_{6_{1}}}}{6} \\ k_{x_{t_{1}}} = \frac{A_{x_{2_{1}}} - A_{x_{1_{1}}}}{2} \\ k_{xy_{1}} = \frac{A_{x_{4_{1}}} - A_{x_{3_{1}}}}{2} \\ k_{x_{1}} = \frac{A_{x_{6_{1}}} - A_{x_{5_{1}}}}{2} \\ a_{y_{0_{1}}} = \frac{A_{y_{1}} + A_{y_{2_{1}}} + A_{y_{3_{1}}} + A_{y_{4_{1}}} + A_{y_{5_{1}}} + A_{y_{6_{1}}}}{6} \\ k_{y_{t_{1}}} = \frac{A_{y_{2_{1}}} - A_{y_{1_{1}}}}{2} \\ k_{y_{1}} = \frac{A_{y_{4_{1}}} - A_{y_{3_{1}}}}{2} \\ k_{y_{1}} = \frac{A_{z_{1}} - A_{y_{5_{1}}}}{2} \\ a_{z_{0_{1}}} = \frac{A_{z_{1}} + A_{z_{2}} + A_{z_{3_{1}}} + A_{z_{4_{1}}} + A_{z_{5_{1}}} + A_{z_{6_{1}}}}{6} \\ k_{z_{1}} = \frac{A_{z_{2_{1}}} - A_{z_{1_{1}}}}{2} \\ k_{z_{1}} = \frac{A_{z_{4_{1}}} - A_{z_{3_{1}}}}{2} \\ k_{z_{1}} = \frac{A_{z_{4_{1}}} - A_{z_{3_{1}}}}{2} \\ k_{z_{1}} = \frac{A_{z_{6_{1}}} - A_{z_{5_{1}}}}{2} \end{cases}$$

$$(9)$$

同理,以*x*,*y*,*z* 轴分别在 90°、270°的 6 个位置 (即位置 2、4、6、8、10、12)的加速度计电压输出作为 误差模型输入,可以获得另外 3 组误差系数:

$$\begin{cases} a_{xo_1} = \frac{A_{xl_2} + A_{x2_2} + A_{x3_2} + A_{x4_2} + A_{x5_2} + A_{x6_2}}{6} \\ k_{x_2} = \frac{A_{xl_2} - A_{x2_2}}{2} \\ k_{xz_2} = \frac{A_{x3_2} - A_{x4_2}}{2} \\ k_{xy_2} = \frac{A_{x5_2} - A_{x6_2}}{2} \end{cases}$$
(10)
$$\begin{cases} a_{yo_2} = \frac{A_{yl_2} + A_{y2_2} + A_{y3_2} + A_{y4_2} + A_{y5_2} + A_{y6_2}}{6} \\ k_{yx_2} = \frac{A_{y1_1} - A_{y2_1}}{2} \\ k_{yz_2} = \frac{A_{y3_2} - A_{y4_2}}{2} \\ k_{yz_2} = \frac{A_{y5_2} - A_{y6_2}}{2} \end{cases}$$

(11)

$$\begin{cases} a_{z_{0_2}} = \frac{A_{z_{1_2}} + A_{z_{2_2}} + A_{z_{3_2}} + A_{z_{4_2}} + A_{z_{5_2}} + A_{z_{6_2}}}{6} \\ k_{z_{r_2}} = \frac{A_{z_{1_2}} - A_{z_{2_2}}}{2} \\ k_{z_2} = \frac{A_{z_{3_2}} - A_{z_{4_2}}}{2} \\ k_{z_{y_2}} = \frac{A_{z_{5_2}} - A_{z_{6_2}}}{2} \end{cases}$$

$$(12)$$

由式(10)~(12)最终得到加速度传感器的误差 模型参数为

$$\begin{cases} a_{x0} = \alpha a_{x0_{1}} + \beta a_{x0_{2}} \\ k_{x} = \alpha k_{x_{1}} + \beta k_{x_{2}} \\ k_{xz} = \alpha k_{xz_{1}} + \beta k_{xz_{2}} \\ k_{xy} = \alpha k_{xy_{1}} + \beta k_{yx_{2}} \\ a_{y0} = \alpha a_{y0_{1}} + \beta a_{y0_{2}} \\ k_{yz} = \alpha k_{yz_{1}} + \beta k_{yz_{2}} \\ k_{y} = \alpha k_{y1} + \beta k_{yz_{2}} \\ k_{yx} = \alpha k_{yx_{1}} + \beta k_{yz_{2}} \\ k_{yx} = \alpha k_{yx_{1}} + \beta k_{yz_{2}} \\ k_{yz} = \alpha a_{z0_{2}} + \beta a_{z0_{2}} \end{cases}$$
(13)

$$k_{zx} = \alpha k_{zx_1} + \beta k_{zx_2}$$

$$k_z = \alpha k_{z_1} + \beta k_{z_2}$$

$$k_{zy} = \alpha k_{zy_1} + \beta k_{zy_2}$$

$$P = \alpha k_{zy_1} + \beta k_{zy_2}$$
(15)

式中 $\alpha = P = 0.5$ 为加权系数。

2.2 温度、零偏和刻度因子的关系模型

将系统放置在恒温箱中,控制系统所处的环境 温度分别为5℃、10℃、15℃、20℃、25℃、30℃、 35℃、40℃、45℃、50℃,待温度稳定后采集加速 度计的输出值,通过误差模型计算出相应的零偏和 刻度因子值,并采用最小二乘法进行拟合。结果如 图 3 所示。



3 实验结果分析

进行标定补偿前、后的对比试验,实验验证平台 采用实验室自主研制的 MEMS 姿态仪,它集成了 3 轴加速度计、3 轴陀螺仪、3 轴磁力计,如图 4 所示。



图 4 MEMS 姿态仪实物图

测量使用标定补偿算法前、后的加速度计输出 变化,在未使用本算法时,加速度计始终使用理想状 态下的零位输出和刻度因子。具体步骤如下:

 1) 将系统上电 10 min,采集模块实时的温度值 以及温度补偿前、后加速度计的测量输出,如图 5 所示。



图 5 上电 10 min 加速度计测量输出和温度输出 由图 5 可知,系统上电后 10 min 内,温度约上 升 2 ℃,加速度计测量输出在这段时间里呈现下降 趋势;而采用标定补偿算法后,加速度计保持平稳 输出。

分别计算图 5(b)、(c)最初和最后 10 s 的数据 均值,在不使用标定补偿算法时分别为 115.34 mg

和 107.76 mg,使用了标定补偿算法时分别为 -17.21 mg和-17.54 mg。

2) 在恒温箱中进行测试,将恒温箱温度分别调 至 5 ℃、10 ℃、15 ℃、20 ℃、25 ℃、30 ℃、35 ℃、 40 ℃、45 ℃、50 ℃,待温度稳定后,连续采集 10 s 的 温度补偿前、后的加速度计输出均值,绘制的曲线图 如图 6 所示。根据图 6 可计算出温度补偿前、后加速 度计输出的标准差分别为 53.25 mg 和 5.46 mg。



图 6 不同温度区间补偿前、后输出

实验结果表明,通过对加速度计每个温度区间 的标定补偿,系统在上电初始化后即可使用,并且标 定补偿后加速度计测量输出精度较标定补偿前提高 了1个数量级,改善了加速度计的输出性能。

4 结束语

MEMS 加速度计的测量精度主要受温度、安装 误差、零偏和刻度因子的影响。MEMS 加速度计的 混合误差标定补偿模型是在各个温度区间下建立加 速度计输出的误差模型,在每个温度区间不用十二 位置法对加速度计进行标定补偿,同时采用最小二 乘法实现零偏和刻度因子与温度关系的一阶拟合, 实现不同温度区间下的动态误差补偿。由实验验 证,标定后 MEMS 加速度计的输出值更接近真实 值,且加速度计输出标准差由标定补偿前的 53.25 mg减小为标定补偿后的 5.46 mg,输出精度 提高了 1 个数量级。本文提出的加速度计标定补偿 法计算量小,易实现,精度较高,对 MEMS 加速度 计工程应用领域有重要价值。

参考文献:

[1] AHMED H, TAHIR M. Accurate attitude estimation of a moving land vehicle using low-cost MEMS IMU sensors[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(7): 1723-1739.

- [2] ELDESOKY A, KAMEL A M, ELHABIBY M, et al. Performance enhancement of low-cost MEMS inertial sensors using extensive calibration technique[C]//S. l. :National Radio Science Conference, 2017:415-424.
- [3] SIPOS M, PACES P, ROHAC J, et al. Analyses of triaxial accelerometer calibration algorithms[J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(5):1157-1165.
- [4] 向高林,路永乐,刘宇,等.基于改进六位置法的一种 MEMS加速度计标定补偿方案[J].重庆邮电大学学 报(自然科学版),2017,29(1):62-67.
- [5] ZHANG W R, ZHANG P Z, ZHAI Z X. Research on an accelerometer calibration method based on six-posture model[J]. Transducer & Microsystem Technologies, 2016, 35(3): 37-40.
- [6] DHALWAR S, KOTTATH R, KUMAR V, et al. Adaptive parameter based particle swarm optimisation for accelerometer calibration[C]// Delhi, India; IEEE Press, 2016:1-5.
- [7] YANG Z M, ZHOU X L, DA-CHENG X U. Research on compensation method of temperature characteristics for MEMS accelerometer based on LM_BP neural network[J]. Instrument Technique & Sensor, 2015, 11 (1):30-33.
- [8] CHEN F, ZHANG K. Identification for temperature model and the method for temperature compensation of quartz flexible accelerometer [C]//S. l.: IEEE Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference, 2015:841-845.
- [9] YE L, SU S W. Experimental design and its posterior efficiency for the calibration of wearable sensors[J]. Journal of Intelligent Learning Systems & Applications, 2015, 7(1):11-20.
- [10] ZHANG W R, ZHANG P Z, ZHAI Z X. Research on accelerometer calibration method based on six-position model [J]. Journal of Sensors and Microsurgery, 2016, 03(1): 37-39.
- [11] NEZ A, FRADET L, LAGUILLAUMI P, et al. Comparison of calibration methods for accelerometers used in human motion analysis[J]. Medical Engineering & Physics, 2016, 38(11):1289-1299.
- [12] DUNÍK J, STRAKA O, IMANDL M. On autocovariance least-squares method for noise covariance matrices estimation[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2017, 62(2):967-972.