

一种基于六姿态模型的加速度计校准方法研究

张文瑞, 张丕状, 翟子雄

(中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要: MEMS 加速度计和陀螺仪是惯性导航系统的重要测量组件。为提高惯性导航系统的测量精度, 在使用加速度计前需要对其各项参数进行标定。在构建了一种理想的三轴 MEMS 加速度传感器输出与重力加速度值、零偏、标度因子之间的模型基础上, 根据加速度计在静止状态下重力加速度在各轴分量的模值与重力加速度的关系, 提出了一种零偏和标度因子的六姿态校准方法, 并建立了标定方程。以 MPU6050 加速度陀螺仪为例, 通过实验验证了该方法的正确性。结果表明: 通过该校准方法可以有效地提高加速度传感器的零偏和标度因子技术指标精度。

关键词: MEMS 加速度计; 零偏; 标度因子; 姿态校准

中图分类号: V249

文献标识码: A

文章编号: 1000-9787(2016)03-0037-03

Research on an accelerometer calibration method based on six-posture model

ZHANG Wen-rui, ZHANG Pi-zhuang, ZHAI Zi-xiong

(Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: MEMS accelerometer and gyro are important measurement components of inertial navigation system (INS). In order to improve measurement precision of INS, it is necessary to calibrate its various parameters before using accelerometer. On the basis of construction of an ideal model between output of three-axis MEMS acceleration sensor, gravity acceleration values, zero bias and scale factor, according to relationship between modulus value of the acceleration of gravity in each axis component and gravity when accelerometer is in stationary state, propose a six-posture calibration method of zero-bias and scale factor and establish calibration equation. The method is proved to be correct through experimental verification taking MPU6050 acceleration gyroscope as example. The results show that the calibration method can effectively improve precision of technical indicators of acceleration sensor such as zero-bias and scale factor by the calibration method.

Key words: MEMS accelerometers; zero bias; scale factor; posture calibration

0 引言

MEMS 惯性器件以其结构简单、低成本、小体积等优势在太空、工业机器人及汽车领域取得了广泛的应用。但是 MEMS 惯性器件的精度指标与其他同类传感器的精度相比要低得多, 制约了它的进一步的应用。目前, 对三轴零偏和标度因子进行校准已经成为一个研究热点^[1-2]。

MEMS 加速度计的主要技术指标有零偏和标度因子。由于批量生产工艺等方面的原因, 产品的一致性不易精确控制, 厂家给出的技术指标较低, 难以满足一些高精度测量的需要, 故对加速度计的各项系数进行标定非常重要。目前普遍采用三轴转台上进行标定陀螺和加速度计^[3], 大量的研究集中在标定算法的解算上^[4]。这些方法以精密转

台为实验平台, 进行翻滚获取被标定传感器的实验数据, 利用转台上的参考加速度计的姿态指向等信息, 通过各种解算算法完成传感器标定。该方法可以实现对加速度传感器的综合指标进行标定, 但对设备的精度和转台的姿态转向精度要求较高, 操作复杂且费时, 另外还有粒子种群算法的复杂性问题^[5-7]。

本文提出了一种采用静态任意六姿态位置的实验数据对加速度计三轴零偏和标度因子进行校准^[8]。这种方法避免使用转台等设备, 而且无需任何的参考传感器, 具有速度快、效率高的优点。

1 虚拟加速度传感器的数学模型与输出算法仿真

1.1 虚拟的三轴 MEMS 加速度计模型建立

根据 MEMS 加速度计的工作原理^[9], 虚拟一种三轴传

收稿日期: 2015-06-29

感器,各轴的重力加速度分量、标度因子、零偏的输出数学误差模型如下

$$\begin{cases} k_x(data_x - offset_x) = g_x \\ k_y(data_y - offset_y) = g_y \\ k_z(data_z - offset_z) = g_z \end{cases} \quad (1)$$

式中 k_x, k_y, k_z 分别为 MEMS 加速度计 X, Y, Z 三轴的标度因子; $data_x, data_y, data_z$ 分别为 MEMS 加速度计三轴的输出值; $offset_x, offset_y, offset_z$ 分别为加速度计三轴的零偏; g_x, g_y, g_z 分别为重力加速度在 X, Y, Z 三轴的分量。

设三轴的标度因子、零偏为六个定数。对于所有的静止姿态,根据力学分解原理, MEMS 加速度计的重力加速度在各轴的输出值满足如下关系

$$\begin{cases} data_x = g_x/k_x + offset_x \\ data_y = g_y/k_y + offset_y \\ data_z = g_z/k_z + offset_z \end{cases} \quad (2)$$

且满足

$$g_x^2 + g_y^2 + g_z^2 = g^2 \quad (3)$$

将式(1)、式(2)代入式(3)得到

$$k_x^2(data_x - offset_x)^2 + k_y^2(data_y - offset_y)^2 + k_z^2(data_z - offset_z)^2 = g^2 \quad (4)$$

1.2 在不同静止姿态下的输出仿真

MEMS 加速度计的姿态均可用三个姿态角描述: θ 为绕 X 轴旋转为俯仰角; γ 为绕 Y 轴旋转为翻滚角; Ψ 为绕 Z 轴旋转为航向角可任意设置。传感器姿态之间可用如下的坐标变换表示。设初始坐标系为地理坐标系 $n: O-X_n Y_n Z_n$ (X_n 指东, Y_n 指北, Z_n 指天), 其绕 Z 轴旋转角度 Ψ 可得到坐标系 1: $O-X_1 Y_1 Z_1$ (Z_n)^[10]。其变换矩阵可表示为

$$C_n^1 = \begin{pmatrix} \cos \Psi & -\sin \Psi & 0 \\ \sin \Psi & \cos \Psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

从坐标系 1: $O-X_1 Y_1 Z_1$ (Z_n) 绕 X 轴旋转角度 θ 得到坐标系 2: $O-X_2 Y_2 Z_2$ 的变换矩阵

$$C_1^2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

从坐标系 2: $O-X_2 Y_2 Z_2$ 绕 Y 轴旋转角度 γ 得到坐标系 $b: O-X_b Y_b Z_b$ 的变换矩阵

$$C_2^b = \begin{pmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{pmatrix}$$

所以, MEMS 加速度计的空间姿态矩阵 C 为

$$C = C_2^b C_1^2 C_n^1$$

MEMS 加速度计处于静止状态时,重力加速度在 X, Y, Z 三轴的输出

$$[g_x \ g_y \ g_z]^T = C[0 \ 0 \ g]^T \quad (5)$$

式中 T 为矩阵转置。

不失一般性,假设虚拟 MEMS 加速度计的零偏和标度因子分别为

$$offset_x = 600 \quad k_x = 0.11$$

$$offset_y = 620 \quad k_y = 0.12$$

$$offset_z = 580 \quad k_z = 0.13$$

设该地区重力加速度为 1000 mg 。

为不失一般性,选取六组姿态角如表 1 所示。

表 1 MEMS 加速度计静止时的任意六位置

Tab 1 Arbitrary six-position of MEMS accelerometer in static state

加速度计旋转角度 X 轴旋转角度 $\theta/(^{\circ})$ 绕 Y 轴旋转角度 $\gamma/(^{\circ})$ 绕负 Z 轴旋转角度 $\Psi/(^{\circ})$			
第一组	30	-60	0
第二组	-20	-65	-60
第三组	35	30	0
第四组	-10	-100	60
第五组	50	50	-75
第六组	-45	-30	50

将上述数据代入式(5),计算结果代入式(2)可得到三轴分量的输出值 $data_x, data_y, data_z$, 如表 2 所示。

表 2 加速度计静止状态时的输出值

Tab 2 Output value of accelerometer in static state

加速度计输出	X 轴加速度计输出/LSB	Y 轴加速度计输出/LSB	Z 轴加速度计输出/LSB
第一组	7418.2	4786.7	3910.9
第二组	8342.3	-2230.2	3634.9
第三组	-3123.4	5399.8	6037.0
第四组	9416.8	-827.1	-735.5
第五组	-3876.4	7003.7	3758.3
第六组	3814.1	-5272.6	5290.6

2 参数的标定模型与仿真实验

2.1 零偏和标度因子参数的标定模型

为了标定三轴 MEMS 加速度计的零偏和标度因子参数,现将加速度计三轴分量的输出值 $data_x, data_y, data_z$ 作为已知数据,把零偏和标度因子看作未知参数。根据式(4)解算出 MEMS 加速度计的六个未知参数 $offset_x, offset_y, offset_z, k_x, k_y, k_z$, 需要有六个满足式(4)的数据。为此,选取表 1 中的六个姿态下对应的表 2 中的输出值,带入式(4)得到六个方程组。从而形成了该虚拟三轴 MEMS 加速度计的零偏和标度因子参数 $offset_x$ 数的标定模型。

为验证该标定模型的正确性,采用牛顿迭代法验证该模型具有唯一解。

为此,得到雅可比矩阵为

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \frac{\partial f_1}{\partial x_3} & \frac{\partial f_1}{\partial x_4} & \frac{\partial f_1}{\partial x_5} & \frac{\partial f_1}{\partial x_6} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_3} & \frac{\partial f_2}{\partial x_4} & \frac{\partial f_2}{\partial x_5} & \frac{\partial f_2}{\partial x_6} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} & \frac{\partial f_3}{\partial x_3} & \frac{\partial f_3}{\partial x_4} & \frac{\partial f_3}{\partial x_5} & \frac{\partial f_3}{\partial x_6} \\ \frac{\partial f_4}{\partial x_1} & \frac{\partial f_4}{\partial x_2} & \frac{\partial f_4}{\partial x_3} & \frac{\partial f_4}{\partial x_4} & \frac{\partial f_4}{\partial x_5} & \frac{\partial f_4}{\partial x_6} \\ \frac{\partial f_5}{\partial x_1} & \frac{\partial f_5}{\partial x_2} & \frac{\partial f_5}{\partial x_3} & \frac{\partial f_5}{\partial x_4} & \frac{\partial f_5}{\partial x_5} & \frac{\partial f_5}{\partial x_6} \\ \frac{\partial f_6}{\partial x_1} & \frac{\partial f_6}{\partial x_2} & \frac{\partial f_6}{\partial x_3} & \frac{\partial f_6}{\partial x_4} & \frac{\partial f_6}{\partial x_5} & \frac{\partial f_6}{\partial x_6} \end{pmatrix}$$

2.2 仿真验证

图 1 和图 2 是通过牛顿迭代法解算出的加速度计的零

偏和标度因子。

从图1和图2可以看出:迭代结果与前面设定的传感器

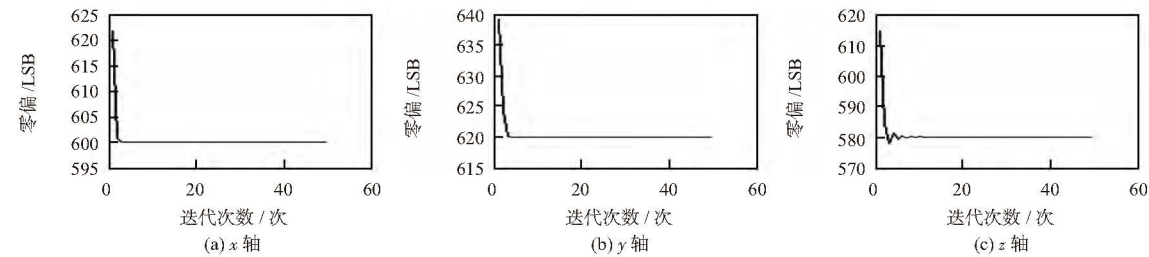


图 1 零偏的仿真结果

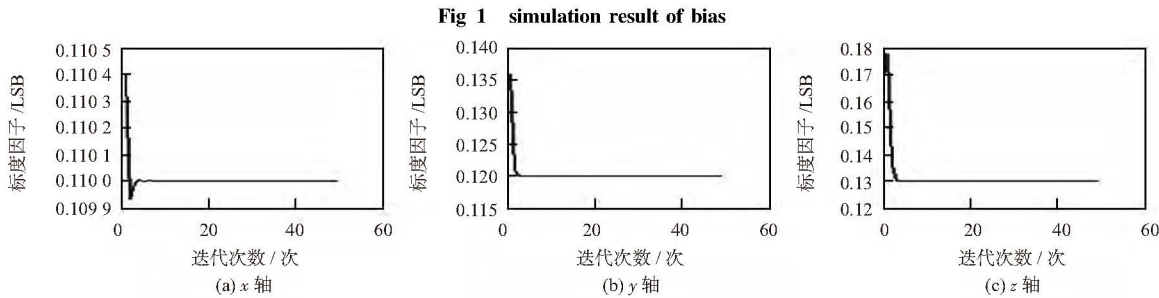


图 2 标度因子的仿真结果

的零偏和标度因子保持一致,且收敛速度快,效果好。当更换新的一组表 1 的姿态角后,其他条件不变,重复上述操作,仍然可以得到同样的结果,由此可以验证算法的正确性,也证实了当初假设的加速度计的数学模型是成立的。

3 实验验证

为验证上述模型可适合于实际的三轴 MEMS 传感器,实验采用 MPU6050 加速度陀螺仪,在加速度计静止状态下测得其在六个不同姿态下的六组不同的输出值 $data_x$, $data_y$, $data_z$, 每组值经过中值滤波处理,代入式(4)得到六个方程,利用牛顿迭代法解算出加速度计的零偏和标度因子。多次改变加速度计的六个姿态,可得到加速度计的多组零偏和标度因子值。选取任意两组有代表性的实验结果分析如表 3 所示。

分别解算各自的方差,然后与 MPU6050 给出的加速度计的零偏和标度因子技术指标(标度因子初始标定误差 $\pm 3\%$; X 轴零偏初始标定误差 $\pm 50\text{ mg}_n$, Z 轴零偏初始标定误差 $\pm 80\text{ mg}_n$) 对比, X 轴零偏误差缩小到 22.5 mg_n , 标度因子误差缩小在 $-0.15\% \sim 0.5\%$; Y 轴零偏误差缩小到 8.2 mg_n , 标度因子误差缩小在 $0.25\% \sim 1.3\%$; Z 轴零偏误差缩小到 37.83 mg_n , 标度因子误差缩小在 $-1.85\% \sim 0.43\%$ 。传感器精度明显得到改善。

4 结束语

仿真结果证明了本文提出的数学模型的正确性,采用 MEMS 加速度计的任意六位置就可快速标定其零偏和标度因子,相比在转台上的标定操作,方法简单易行,同时也减

表 3 不同姿态下加速度计的两组零偏和标度因子标定结果

Tab 3 Calibration results of two groups of zero-bias and scale factor of accelerometer in different postures						
组别	姿态	$data_x$	$data_y$	$data_z$	结果	
第一组	姿态 1	-186	-8	1936	$offset_x$	30.4
	姿态 2	-24	-107	-2200	$offset_y$	11.8
	姿态 3	-19	-2021	-166	$offset_z$	-128.4
	姿态 4	26	2039	-303	k_x	0.00049293
	姿态 5	-2032	-44	-305	k_y	0.00049164
	姿态 6	2101	-6.0952	-144	k_z	0.00048173
第二组	姿态 1	808	-1869	68	$offset_x$	29.096
	姿态 2	-247	1151	-1861	$offset_y$	12.889
	姿态 3	-19	-2021	-166	$offset_z$	-82.198
	姿态 4	26	2039	-303	k_x	0.0004824
	姿态 5	-2032	-44	-305	k_y	0.0004911
	姿态 6	2101	-6	-144	k_z	0.0004610

少了由于转台安装等因素引起的误差对精度标定过程的影响。该方法可用于对其他传感器的参数进行标定。另外,加速度计静态时的各个姿态的选取是任意的,旋转角度任意,不必具体确定加速度计的摆放角度^[1]。这种方法只是对加速度计的零偏和标度因子进行简单标定,没有考虑三轴之间的非正交关系、温度、环境、噪声等因素的影响。为了进一步提高 MEMS 加速度计的精度,这也是以后要深入研究的重要问题。

参考文献:

[1] 宋丽君,秦永元. MEMS 加速度计的六位置测试法[J]. 测控

(下转第 48 页)

着喉部雷诺数 Re 增大而增大,而 Re 会随着过流面积的增大而增大。因此,随着过流面积的增大,实际理论计算值应更大一些。 C_d 与 Re 对应关系如表 4 所示。

表 4 流出系数与喉部雷诺数对应关系

Tab 4 Corresponding relationship between discharge coefficient and throat Reynolds number

雷诺数 Re	流出系数 C_d	雷诺数 Re	流出系数 C_d
2.1×10^4	0.977 1	3×10^5	0.990 9
3×10^4	0.980 2	5×10^5	0.992 1
5×10^4	0.983 7	7×10^5	0.992 6
7×10^4	0.985 6	1×10^6	0.993 2
1×10^5	0.987 3	3×10^6	0.994 3
2×10^5	0.989 8	7×10^5	0.994 9

4 结 论

本文通过建模分析计算、CFD 仿真的相互印证可知,变面积临界流文丘里喷嘴在背压比小于最大允许背压比时,其流场能够达到临界流状态。棒状节流体流场简单稳定,理论计算方便,但更换较为麻烦;锥状节流体调节方便,其最小喉部位置较原喉部位置有所偏移,但重复性较差;台锥状节流体结合了棒状节流体和锥状节流体的特点,不但调节方便,而且具有较好的重复性。仿真虽与理论计算有一定误差,但是通过查表对 C_d 值的修正,或通过 PVTi 等设备的实流标定,得到准确的 C_d ,能进一步提高计量的准确

性。

参考文献:

- [1] ISO/TC 30/SC 2. ISO 9300-2005. Measurement of gas flow by means of critical flow Venturi nozzles [S].
- [2] GB/T 21188-2007. 用临界流文丘里喷嘴测量气体流量 [S].
- [3] 梁国伟,周宁宁,李长武. 临界流文丘里喷嘴流量计的原理与应用 [J]. 中国计量学院学报, 2004, 15(3): 186-190.
- [4] Kim J H, Kim H D, Park K A. Computational/experimental study of a variable critical nozzle flow [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2006, 17: 81-86.
- [5] Kim H D, Kim J H, Park K A, et al. Computational study of the gas flow through a critical nozzle [J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2003, 217(10): 1179-1189.
- [6] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 85-88.
- [7] 胡 坤,李振北. ANSYS ICEM CFD 工程实例详解 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014: 55-60.
- [8] 王丽辰,朱 云,郑 哈,等. 基于 Fluent 的临界流文丘里喷嘴的内部流场仿真分析 [J]. 科学技术与工程, 2013, 13(34): 10392-10396.

作者简介:

陈元杰(1984-),男,浙江慈溪人,硕士,工程师,主要从事气体流量计性能研究。

(上接第 39 页)

- 技术, 2009(7): 11-13.
- [2] 彭承明,曾占魁,舒 嶸,等. 静电加速度计标度因数和零偏误差标定 [J]. 中国惯性技术学报, 2009, 17(5): 582-585.
 - [3] 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.
 - [4] Fong W T, Ong S K, Nee A Y C. Methods for in-field user calibration of an inertial measurement unit without external equipment [J]. Measurement Science & Technology, 2008, 19(8): 817-822.
 - [5] 邱浩阳,虞水俊. 惯导平台加速度计静态多位置模观测标定方法 [J]. 导航与控制, 2013, 12(2): 63-67.
 - [6] 戴邵武,王克红,钱俭学. 基于 AKPSO 算法的加速度计快速标定方法 [J]. 传感器与微系统, 2015, 34(2): 69-72.
 - [7] 戴邵武,万 龙,徐胜红. 基于迭代计算的加速度计标定方

法 [J]. 舰船电子工程, 2014(1): 63-65.

- [8] Paris B, Bahrami M, Esfahani A, et al. Calibration verification of a low-cost method for MEMS accelerometers [J]. IEEE Transaction of the Institute of Measurement and Control, 2014, 36(5): 579-587.
- [9] 赵 翔,杜普选,李 虎,等. 基于 MEMS 加速度计和陀螺仪的姿态检测系统 [J]. 铁路计算机应用, 2012, 21(3): 15-18.
- [10] 秦永元. 惯性导航 [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 5-8.
- [11] Frosio I, Pedersini F, Borghese N A. Autocalibration of MEMS accelerometers [J]. IEEE Transaction of the Institution of Measurement and Control, 2009, 58(6): 2034-2041.

作者简介:

张文瑞(1991-),女,山西吕梁人,硕士研究生,主要从事信号处理。

(上接第 43 页)

- [3] 巴海涛. 无人机航迹规划研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
- [4] 刘 胜. 基于 Agent 的机动通信战术规划的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [5] 余 斌. Multi-Agent 研究与应用 [D]. 合肥: 安徽大学, 2006.
- [6] Peng Zhihong, Wu Jinping, Chen Jie. Three-dimensional multi-constraint route planning of unmanned aerial vehicle low-altitude penetration based on coevolutionary multi-agent genetic algorithm [J]. Journal of Central South University of Technology, 2011,

18(5): 1502-1508.

- [7] 王 健. 基于遗传算法的无人机飞行器航迹规划研究与应用 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2011.
- [8] 饶卫平,杨任农,雷晓义,等. 基于多智能体遗传算法的无人机突防航线规划 [J]. 计算机仿真, 2015, 32(4): 39-43.

作者简介:

饶卫平(1990-),男,陕西商洛人,硕士研究生,主要研究领域为任务规划。

杨任农,通讯作者, E-mail: 857805523@qq.com。