文章编号:1004-2474(2019)03-0440-05

基于 24 位置的 MEMS 惯性传感器快速标定方法

孙佳,邹靖,胡桐

(齐鲁工业大学(山东省科学院),山东省科学院海洋仪器仪表研究所,山东省海洋环境监测技术重点实验室,山东 青岛 266001) 摘 要:针对微惯性测量单元原始输出信息受零偏、标度因数、非正交误差等误差项干扰影响测量精度的问 题,提出一种无需借助高精度转台的 MEMS IMU 快速原位标定方案。在分析 MEMS 惯性传感器输出特性的基础 上建立传感器误差模型,利用六面体夹具设计 IMU 24 位置连续转停标定方案,以重力及各次旋转角度为参考信息 完成传感器误差标定。针对加速度计零偏、标度因数、非正交误差 9 个参数构造标定模型,采用牛顿法估计误差参 数最优值,考虑陀螺仪零偏与标度因数 6 个误差参数,利用最小二乘法计算误差参数最优估值。分别进行加速度 计、陀螺标定补偿实验,实验结果表明,提出的 MEMS IMU 快速原位标定方法能快速得到传感器误差参数,提高了 输出数据精度。

关键词:微惯性测量单元;标定;传感器误差;牛顿法;最小二乘法 中图分类号:TP212 文献标识码:A DOI:10.11977/j.issn.1004-2474.2019.03.027

A Fast Calibration Method for MEMS Inertial Sensors Based on 24-Position

SUN Jia, ZOU Jing, HU Tong

(Institute of Oceanographic Instrumentation, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences),

Shandong Provincial Key Laboratory of Ocean Environmental Monitoring Technology, Qingdao 266001, China)

Abstract: Aiming at the problem that the original output information of the micro inertial measurement unit is affected by the errors of bias, scale factor and non-orthogonal error, a fast in-situ calibration scheme of MEMS IMU without high-precision turntable is proposed in this paper. Based on the analysis of the output characteristics of MEMS inertial sensors, the sensor error model is established. The calibration scheme of IMU 24-position is designed by using hexahedron fixture. The sensor error calibration is completed by using the gravity and each rotation angle as reference information. A calibration model is constructed for 9 parameters of accelerometer bias, scale factor and non-orthogonal error. The Newton method is used to estimate the optimal value of error parameters. Considering the 6 error parameters including gyro bias and scale factor, the optimal estimation of error parameters is calculated by least square method. The calibration compensation experiments on the accelerometer and gyro are carried out respectively. The experimental results show that the proposed fast in-situ calibration method for the MEMS IMU can quickly obtain the sensor error parameters and improve the output accuracy of the data.

Key words: micro inertial measurement unit; calibration; sensor errors; Newton method; least square method

0 引言

微惯性/卫星组合定位系统、鞋绑式微惯性行人 室内定位系统的研究及应用都依靠微机电系统 (MEMS)惯性传感器提供重要信息^[1-4]。但 MEMS 惯性传感器自身存在更大零偏、噪声、标度因数、非 正交误差且具有温度差异^[5-7]。标定是确定误差参 数补偿并提高数据精度的重要手段,利用传感器输出 与参考信息进行比较,从而确定各项误差参数^[8-9]。 传统标定方法借助速率转台提供可靠的方向及旋转 角速率作为参考^[10-12]。通过设置合理的转停方案, 该类方法能以较高精度估计出惯性传感器的各类误 差,但传统基于转台的标定方法存在设备昂贵以及 操作流程复杂等弊端,且无法实现系统的现场标定。

本文设计了一套无需借助高精度转台设备的 MEMS IMU 快速原位标定方案。该方法将惯性测 量单元(IMU)固定于六面体夹具内放置在平面上,

作者简介:孙佳(1983-),男,山东烟台人,工程师,硕士,主要从事海洋仪器仪表及自动控制的研究。

收稿日期:2018-06-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41705046,41606112);山东省自然科学基金资助项目(ZR2016DB32)

以 IMU 不同放置方向静止阶段重力信息标定加速 度计误差,以相邻静止阶段的旋转角度标定陀螺仪 误差。一次数据采集即可完成加速度计与陀螺仪的 标定,简化了标定流程,减少了标定时间且不影响标 定精度。

1 三轴加速度计标定

1.1 加速度计误差模型

受制造工艺及使用条件变化等影响因素,三轴 MEMS加速度计各轴可能不严格正交,即存在非正 交误差^[10]。非正交误差成因示意图如图1所示,图 中 x_s, y_s, z_s 为加速度计各敏感轴, x_b, y_b, z_b 为运动载 体坐标系的三轴, $\theta_{ij}(i, j = x, y, z)$ 是失准角,表示加 速度计第*i*敏度轴围绕载体第*j*坐标轴的旋转。



图 1 非正交误差成因示意图

θ_{ij}一般为小角度,因此,考虑小角度,假设可以得 到加速度计输出由 b 系变换至 s 系的转换矩阵^[13]:

$$\mathbf{C}_{b}^{s} \approx \begin{bmatrix} 1 & -\theta_{yz} & \theta_{zy} \\ \theta_{xz} & 1 & -\theta_{zx} \\ -\theta_{xy} & \theta_{yx} & 1 \end{bmatrix}$$
(1)

简化模型,定义b系与s系坐标原点一致, x_b 轴 与 x_s 轴指向一致,且 y_b 轴位于 x_sOy_s 平面内。此 时,夹角 { θ_{xx} θ_{yx} } 均为 0,则式(1)可降为

$$\boldsymbol{C}_{b}^{s} = \begin{bmatrix} 1 & -\theta_{yz} & \theta_{zy} \\ 0 & 1 & -\theta_{zx} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(2)

3 个轴向加速度计原始输出与真实加速度信息 的比例系数即为标度因数 K,无输入前提下的输出 为零偏 V,则包含参数误差的三轴加速度计输出模 型可表示为

$$\boldsymbol{A}^{b} = \boldsymbol{K}_{a}\boldsymbol{C}^{b}_{s}(\boldsymbol{A}^{s} - \boldsymbol{\nabla})$$
(3)

式中: A^b 为载体系下比力信息; A^s 为加速度计各轴 向实际输出; K_a 为由 k_x 、 k_y 、 k_z 组成的加速度计对角 阵; $C_s^b = (C_b^b)^{-1}$; ∇ 为由 ∇_x 、 ∇_y 、 ∇ 组成的加速度计零 偏向量。

为简化标定模型,式(3)未考虑 MEMS 加速度

计噪声,噪声影响可通过对一段时间内的原始数据 求平均的方法消除。

1.2 MEMS 加速度计标定方法

将式(3)中涉及的加速度计 9 个误差参数整理 为向量形式:

 $\begin{aligned} \boldsymbol{X} &= \begin{bmatrix} \nabla_{x} & \nabla_{y} & \nabla_{z} & \boldsymbol{k}_{x} & \boldsymbol{k}_{y} & \boldsymbol{k}_{z} & \boldsymbol{k}_{xy} & \boldsymbol{k}_{xz} & \boldsymbol{k}_{yz} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \end{aligned}$ (4) $\overrightarrow{\mathrm{T}} \boldsymbol{H} \boldsymbol{k}_{xy} \cdot \boldsymbol{k}_{xz} \cdot \boldsymbol{k}_{yz} & \boldsymbol{\mathcal{H}} \boldsymbol{K}_{a} \boldsymbol{C}_{s}^{b} \ddagger \overrightarrow{\mathrm{T}} \boldsymbol{\mathcal{H}} \overrightarrow{\mathrm{T}} \overrightarrow{\mathrm{T}} \overrightarrow{\mathrm{T}} \boldsymbol{k}_{xy} = \boldsymbol{\theta}_{yx} \boldsymbol{k}_{x}, \\ \boldsymbol{k}_{xz} &= (\boldsymbol{\theta}_{yx} \boldsymbol{\theta}_{zx} - \boldsymbol{\theta}_{zy}) \boldsymbol{k}_{x}, \boldsymbol{k}_{yz} = \boldsymbol{\theta}_{zx} \boldsymbol{k}_{y} \circ \end{aligned}$

加速度计第 k 次输出模型可改写为关于误差参数向量 X 的函数:

$$\boldsymbol{A}_{k}^{b} = \boldsymbol{K}_{a}\boldsymbol{C}_{s}^{b}(\boldsymbol{A}_{k}^{s} - \boldsymbol{\nabla}) = f(\boldsymbol{A}_{k}^{s}, \boldsymbol{X})$$
(5)

加速度计的标定以重力矢量为参考信息,静止 状态下,加速度计只受重力矢量影响,其3个轴向输 出信息的矢量和应与重力矢量相同。将 IMU 按不 同方向放置并保持静止,能够完成各轴加速度计标 定。定义代价函数:

$$F(\boldsymbol{X}) = \sum_{k=1}^{N} \left(\| f(\bar{\boldsymbol{A}}_{k}^{s}, \boldsymbol{X}) \| - g \right)^{2}$$
(6)

式中: $\| f(\mathbf{A}_{k}, \mathbf{X}) \|$ 为第 k 个方向加速度计输出均 值 \mathbf{A}_{k}^{*} 的模值,取均值可以消除噪声影响; g 为重力 加速度模值; N 为用于标定的 IMU 放置方向数。

加速度计标定即确定 X 的最优估值满足代价 函数 F(X) 最小,即

$$\mathbf{X} = \arg\min\{F(\mathbf{X})\}$$
(7)

式中 *F*(*X*) 为非线性函数。式(7) 为非线性优化问题,本文采用牛顿法迭代计算:

 $X_{k} = X_{k-1} - [H(F(X))]^{-1} \nabla F(X)$ (8) 式中: $\nabla F(X)$ 为 F(X)的梯度; H(F(X))为 Hessian 矩阵。

由式(8)可知,每一步迭代都使代价函数减小, 可设置当 || X_k-X_{k-1} || 小于给定阈值时停止迭代。 为防止牛顿法迭代收敛到局部极小值点,需要精心 设置误差参数向量的迭代初始值,使其尽量靠近全 局最优解。采用简易六位置静态标定方法确定迭代 初值,将 IMU 放在平面上,依次使其三通道加速度 计大致处于竖直方向,分别近似指向重力方向及其 反方向。加速度计零偏、标度因数的迭代初始值可 近似计算为

$$\begin{cases} \nabla_{i} = \frac{A_{i}^{+} + A_{i}^{-}}{2g} \\ k_{i} = \frac{A_{i}^{+} - A_{i}^{-}}{2g} \end{cases} \quad (i = x, y, z) \tag{9}$$

式中 *A⁺*, *A⁻*, 分别为第*i* 轴加速度计指上和指下。 2 三轴 陀螺仪 标 定

2.1 陀螺仪误差模型

与 MEMS 加速度计数据输出特性相似, MEMS 陀螺仪同样包含零偏、标度因数和非正交误差。考虑到当前三轴陀螺仪都集成在同一芯片上, 各轴向非正交误差远小于零偏、标度因数、陀螺漂移 及噪声等引起的误差^[14-15],因此,三轴陀螺仪输出 误差模型可表示为

$$\boldsymbol{\omega}^{b} = \boldsymbol{K}_{g}(\boldsymbol{\omega}^{s} - \boldsymbol{\varepsilon}) \tag{10}$$

式中: ω^{b} 为载体系下角速率信息; ω^{s} 为陀螺仪各轴向实际输出; K_{g} 为由 k_{x} 、 k_{y} 、 k_{z} 组成的陀螺仪对角阵; \mathcal{E} 为由 ε_{x} 、 ε_{y} 、 ε_{z} 组成的陀螺零偏向量。

2.2 MEMS 陀螺仪标定方法

MEMS 陀螺噪声大,无法有效测量地球旋转角 速度,因此,MEMS 陀螺的标定需要外界提供有效 输入。标定时,由 IMU 静止开始绕陀螺仪某一轴 旋转指定角度,然后静止,则该阶段由陀螺输出计算 的角度变化 Δθ_m 可由下式计算:

$$\Delta heta_{im} = k_i (ar{\omega}_{im} - oldsymbol{arepsilon}_i) t_m$$

(i = x, y, z; m = 1, 2, ..., n) (11) 式中: $\bar{\omega}_{im}$ 为第*m* 次旋转的陀螺*i* 轴输出; t_m 为第*m* 次旋转经历的时间。

式(11)可改写为线性方程 Ax=b 形式,其中

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\bar{\omega}}_{i1} t_1 & -t_1 \\ \vdots & \vdots \\ \boldsymbol{\bar{\omega}}_{in} t_n & -t_n \end{bmatrix}$$
(12)

$$\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} k_i \\ k_i \boldsymbol{\varepsilon}_i \end{bmatrix} \tag{13}$$

$$\boldsymbol{b} = \begin{bmatrix} \Delta \theta_{i1} \\ \vdots \\ \Delta \theta_{in} \end{bmatrix}$$
(14)

陀螺仪输出计算所得转过的角度 $\Delta \theta$ 与 IMU 真 实转过角度的误差为 $e(\mathbf{x}) = \Delta \theta - \mathbf{b}$ 。

 $\mathbf{X} = \begin{bmatrix} -0.05 & -0.11 & 0.14 & 1.03 & 1.01 & 0.99 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$

确定 X 的迭代初值后,按图 3 所示 24 位置 IMU 旋转顺序依次旋转 IMU,设置采样率 100 Hz 采集传感器输出数据。IMU 在每个位置静止 5 s, 然后按图中指定旋转轴平稳转至下一位置。IMU 陀螺仪标定即求 x 的最优估计,使误差 e(x) 最小,即

$$\hat{\boldsymbol{x}} = \arg\min\{\boldsymbol{e}(\boldsymbol{x})\} \tag{15}$$

由最小二乘理论,使式(15)误差取得最小值的 x为

$$\boldsymbol{x} = (\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{b}$$
(16)

式(16)包含2个未知参数,因此,对单一轴向陀 螺仪进行标定只需2次以上的旋转即可完成。

3 实验结果与分析

根据文中第 1、2 部分给出的 MEMS IMU 标定 方法,利用一个正六面体夹具对实验室自研 MEMS IMU 进行标定。IMU 采用 Bosch 公司的 BMI055, 尺寸为 3 mm×4.5 mm×0.95 mm,采样率为 100 Hz,其主要参数如表 1 所示。六面体夹具(见 图 2)是为了便于陀螺仪标定中实现 IMU 绕指定敏 感轴转动指定角度。

表1 IMU主要参数

参数	加速度计	陀螺仪
量程	\pm 8 g	±500 (°)/s
噪声密度	150 $\mu g/\mathrm{Hz}$	0.014 (°)/s/ $\sqrt{\text{Hz}}$



图 2 实验设置

标定时,首先将 IMU 固定在六面体夹具中心, 分别让 IMU 各轴依次指上再指下,在每个位置静 止一段时间,依据静止阶段重力敏感轴输出,并利 用式(9)快速估计加速度计近似零偏和标度因数 误差。将非正交误差的初始值取 0,得到 X 迭代初 始值:

9 0 0 0]^T (17)
共经历 24 个不同位置,23 次旋转,共耗时约 5 min。
每次旋转角度固定为 90°,24 位置包含了加速度计
三轴分别指上和指下,23 个旋转也包含了陀螺仪分
别绕其三轴正向和反向旋转。按相同方式独立采集

10 组数据分别用于实验验证。



图 3 IMU 24 位置及旋转顺序示意图

采集数据后提取所有静止阶段加速度计输出数据,按牛顿法迭代估计加速度计误差向量;提取旋转阶段对应敏感轴陀螺仪输出数据,按最小二乘法估计该轴陀螺仪误差参数。加速度计10组独立标定实验均值及标准差如表2所示,陀螺仪标定实验均值及标准差如表3所示。

表 2 加速度计标定结果

误差参数	均值	标准差
$ abla_{\!x}/g$	-0.0078	0.000 5
$ abla_{\!\scriptscriptstyle \mathcal{Y}}/g$	-0.010 6	0.000 9
$ abla_{\!z}/g$	0.016 3	0.003 1
k_x	1.007 7	0.000 1
k_y	1.001 8	0.000 7
k_z	0.987 2	0.000 3
k_{xy}	0.018 5	0.000 4
k_{xx}	-0.000 8	0.000 5
$k_{_{yz}}$	0.020 1	0.000 5
表 3	陀螺仪标定结果	
误差参数	均值	标准差
$\epsilon_x/[(^\circ) \cdot s^{-1}]$	-0.047 9	0.004 2
$\epsilon_y / [(\circ) \cdot s^{-1}]$	0.064 5	0.002 3
$\mathbf{\epsilon}_z / [(\circ) \cdot \mathbf{s}^{-1}]$	0.051 8	0.006 2
k_x	0.973 8	0.002 4

佥	耒
-77	1X.

误差参数	均值	标准差
k_y	0.984 5	0.0017
k_z	0.947 7	0.002 1

利用加速度计标定结果分别补偿 IMU 在 24 个 位置处的加速度输出,得到补偿前、后的加速度模值 如图 4 所示。补偿前,加速度模值波动较大,标准差 为 0.019 1 g;补偿后,加速度模值稳定在重力加速 度模值附近,标准差降低至 0.001 7 g。



图 4 补偿前、后的加速度模值

获得加速度计、陀螺仪标定结果后,将 IMU 转 回到初始位置(见图 3 位置 1)并保持静止,此时, IMU 中 z 轴敏感重力矢量,x、y 轴处于近似水平面 内。设置采样率 100 Hz、采集 1 min 的 IMU 输出 数据,利用表 2、3 得到的标定结果分别对加速度计 和陀螺仪输出进行补偿,得到补偿前、后的加速度 计、陀螺输出信息对比结果,如图 5、6 所示。由图可 见,补偿后的 x、y 轴加速度输出稳定在 0 附近,z 轴 加速度输出稳定在重力加速度模值附近。补偿后的 陀螺仪三通道输出都稳定在 0 附近。





4 结束语

MEMS IMU 正式应用前需要对其进行误差参数标定与补偿以确保输出数据的精度与可靠性。本 文在分析 MEMS 加速度计、MEMS 陀螺仪输出特 性的基础上设计了一套无需借助高精度转台的 MEMS IMU 快速原位标定方案,该方法利用一个 正六面体夹具设计 24 位置连续转停方案。利用牛 顿迭代法估计加速度计零偏、标度因数和非正交误 差共 9 个误差参数,利用最小二乘法估计陀螺仪零 偏和标度因数 6 个误差参数。对实验室自研 MIMU 进行标定补偿实验,结果表明,提出的 MEMS IMU 快速原位标定方法得到的误差参数能 有效补偿各轴传感器误差,提高了 IMU 输出数据 的精度,对实际应用具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] FISCHER C, TALKAD SUKUMAR P, HAZAS M. Tutorial: Implementing a pedestrian tracker using inertial sensors[J]. Pervasive Computing, IEEE, 2013, 12(2): 17-27.
- [2] REN M, PAN K, LIU Y, et al. A novel pedestrian navigation algorithm for a foot-mounted inertial-sensor-based system[J]. Sensors, 2016, 16(139): 1-13.
- [3] GONZALEZ R, GIRIBET J I, PATINO H D. NaveGo: A simulation framework for low-cost integrated navigation systems[J]. Control Engineering & Applied Informatics, 2015, 17(2): 110-120.
- [4] DEPPE O, DORNER G, KONING S, et al. MEMS and FOG technologies for tactical and navigation grade inertial sensors recent improvements and comparison [J]. Sensors, 2017, 17(567): 1-22.

 [5] 何昆鹏,王晨阳,王晓雪. 基于高斯牛顿迭代的 MIMU误差参数辨识[J]. 沈阳工业大学学报,2015, 37(3):318-323.
 HEKP,WANGCY,WANGXX. Error parameter

identification of MIMU based on Gauss Newton iteration[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2015, 37(3): 318-323.

[6] 李杰,田晓春,范玉宝,等.基于椭球拟合的弹载 MIMU现场快速标定技术[J].弹箭与制导学报, 2013,33(1):10-12.
LI J, TIAN X C, FAN Y B, et al. Field fast calibration techniques for missile-borne MIMU based on ellip-

tion techniques for missile-borne MIMU based on ellipsoid fitting[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2013, 33(1): 10-12.

- [7] XING H, HOU B, LIN Z, et al. Modeling and compensation of random drift of MEMS gyroscopes based on least squares support vector machine optimized by chaotic particle swarm optimization [J]. Sensors, 2017, 17(10): 1-15.
- [8] XU Y, WANG Y, SU Y, et al. Research on the calibration method of micro inertial measurement unit for engineering application[J]. Journal of Sensors, 2016, 2016(1): 1-11.
- [9] LI Y, NIU X, ZHANG Q, et al. An in situ hand calibration method using a pseudo-observation scheme for low-end inertial measurement units [J]. Measurement Science & Technology, 2012, 23(10):105104 -105113.
- [10] 田晓春,李杰,范玉宝,等. 一种微惯性测量单元标 定补偿方法[J]. 传感技术学报,2012,25(10): 1411-1415.
 TIAN X C, LI J, FAN Y B, et al. A calibration compensation method for micro inertial measurement unit [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(10): 1411-1415.
- [11] 韦宗喜. 微惯性测量单元标定技术及误差补偿研究 [D]. 长春:中国科学院研究生院,2015.
- [12] 于婷,孙伟,文剑. MEMS 惯性组件的误差特性分析 与标定[J]. 传感技术学报,2016,29(6):859-864.
 YU T, SUN W, WEN J. Error analysis and calibration of MEMS inertial components[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2016, 29(6):859-864.
- [13] SKOG I, HÄNDEL P. Calibration of a MEMS inertial measurement unit [C]//Brazil: XVII IMEKO World Congress Metrology for a Sustainable Development, 2006: 1-6.
- [14] PASSARO V M N, CUCCOVILLO A, VAIANI L, et al. Gyroscope technology and applications: A review in the industrial perspective[J]. Sensors, 2017, 17 (10): 1-22.
- [15] 曹景伟,朱宝全. 应用 MEMS 陀螺仪和加速度计的 汽车运动姿态测量[J]. 重庆理工大学学报(自然科 学),2018(4):48-54.
 CAO Jingwei, ZHU Baoquan. Vehiclemotion attitude measurement based on MEMS gyroscope and accelerometer[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science),2018(4):48-54.