第43卷 第4期 仪 器 仪 表 学 报 Vol. 43 No. 4
2022年4月 Chinese Journal of Scientific Instrument Apr. 2022

DOI：10.19650/j.cnki.cjsi.J2109062

基于两步修正法的 MEMS 三轴陀螺仪标定方法*

邹泽兰[1]，徐同旭[1]，徐　祥[2]，赵鹤鸣[1]
（1.苏州大学电子信息学院　苏州　215006；2.南京理工大学自动化学院　南京　210094）

摘　要：针对目前三轴陀螺仪标定存在依赖于昂贵的转台设备或标定参数不完全的问题，本文提出了一种了基于两步修正法的MEMS三轴陀螺仪标定方法。该方法首先使用六位置法对加速度计12参数模型、三轴陀螺仪比例因子、三轴陀螺仪静态零偏进行标定补偿，然后对三轴陀螺仪非正交误差模型建模，进行系统级标定。两步修正法可实现在无精密设备条件下快速准确的对各项误差进行辨识，获得良好的标定效果。仿真实验表明，本文算法所获得的非正交误差均值接近1%，标准差小于0.1%；比例因子误差均值小于0.14%，标准差小于0.004%，且具有很好的一致性。实际实验表明，65 s纯惯性导航姿态更新结果中，该标定方法的俯仰角误差精度可以达到0.624°，横滚角误差精度可以达到0.67°。

关键词：MEMS三轴陀螺仪；六位置法；系统级标定；误差模型
中图分类号：V241.62　　TH824　　**文献标识码**：A　　**国家标准学科分类代码**：510.40

MEMS triaxial gyroscope calibration based on two-step correction method

Zou Zelan[1], Xu Tongxu[1], Xu Xiang[2], Zhao Heming[1]
(*1. School of Electronic and Information Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China;*
2. Automation college of Nanjing University of Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Aiming at the problem that the current three-axis gyroscope calibration relies on expensive turntable equipment or the calibration parameters are incomplete, a method based on a two-step correction method is proposed. Firstly, the six-position method is adopted to calibrate and compensate the 12-parameter model of the accelerometer, the scale factor of the triaxial gyroscope, and the static bias of the three-axis gyroscope. Then, the non-orthogonal error model of the triaxial gyroscope is formulated for the system-level calibration. The two-step correction method can quickly and accurately identify various errors without precision equipment, and obtain a good calibration effect. Simulation experiments show that the average non-orthogonal error obtained by this algorithm is close to 1%, the standard deviation is less than 0.1%, the average scale factor error is less than 0.14%, and the standard deviation is less than 0.004%. The actual experiment shows that in the attitude update results of 65 s pure inertial navigation, the pitch angle error and the roll angle error of this calibration method can reach 0.624° and 0.67°.

Keywords: MEMS triaxial gyroscope; six-position method; system-level calibration; error model

0　引　　言

随着微机电系统(micro electro mechanical system, MEMS)技术的发展，以陀螺仪和加速度计为代表的微惯性测量单元(miniature inertial measurement unit, MIMU)具有体积小、成本低、功耗小等特点，目前已广泛应用于民用消费、船舶、各类飞行器和专用设备的导航中。基于MIMU与GNSS信号的组合导航或多源组合导航定位是目前的研究热点。然而，对于低精度的MEMS传感器，在出厂标定时没有精确标定，传感器输出中含有各种标定误差，例如：零偏、比例因子、非正交误差、温度漂移等确定性误差。所以通过标定过程来获得确定性误差的参数并进行校准，在导航定位应用之前是非常必要的。

收稿日期：2021-12-21　　Received Date：2021-12-21
*基金项目：国家自然科学基金(61803278)、东南大学微惯性仪表与先进导航技术教育部重点实验室(B类)开放基金(SEU-MIAN-201802)项目资助

传统的陀螺仪标定方法是通过测试标定设备提供给陀螺高精度的角速率，通过最小二乘或多位置迭代最小二乘方法进行标定[1-5]。这种标定方法通常用于较高精度的光纤陀螺中。对于低成本、低精度的 MEMS 三轴陀螺仪，无转台标定方法研究是更加必要的。Fong 等[6]提出利用校正后的加速度计值和捷联惯性导航算法构造目标函数(静态位置下姿态不变)标定陀螺，通过多位置伪静态比较姿态，但需要保持 IMU 在多个位置下静止，才能达到一定的精度，另外利用陀螺积分解算姿态也会存在积分累计误差。类比于加速度计、磁力计可以通过构造目标函数使用非线性优化等方法[7-8]，陀螺仪理论上在静态位置下角速度模值等于地球自转速度，所以龙达峰提出利用椭球拟合法实现陀螺仪的快速标定[9]，但 MEMS 陀螺的分辨率有限，一般大于地球自转速度，无法通过敏感地球自转速度来标定陀螺，所以这种标定方式并不适合 MEMS 陀螺仪的标定。文献[10-11]提出在无转台时利用手动转动提供参考角度，采用简易的最小二乘方法，这种标定方式忽略了非正交误差，且要求手动转动过程尽可能平滑，速率较小。

为了适应 MEMS 陀螺能够即用即标，不受设备约束，且能得到较高精度的误差参数，基于 Kalman 滤波的系统级标定和矢量叉乘法[12]实现陀螺标定成为热门研究。Li 等[13]采用磁力计作为参考矢量辅助陀螺标定，需要先使用椭球拟合方法校正磁力计，但是，磁信息本身是一个不稳定的外部信息源，标定过程容易受环境的干扰。Mikov 等[14]利用加计辅助陀螺标定，陀螺仪参数是通过比较静态条件下的加速度数据和旋转阶段陀螺仪输出的累计方向变化来确定的。矢量叉乘标定方法分为积分形式和微分形式，微分形式对陀螺标定噪声比较敏感，积分形式对参考矢量的噪声比较敏感，所以这对 MEMS 陀螺标定不合适。Jurman 等[15]采用恒定角速率绕灵敏轴转动，经过 4 次测量，系统级标定陀螺的 9 个参数，没有专业设备对恒定角速率控制是比较困难的。Li 等[16]采用系统级标定方法，但只考虑了零偏，忽略了比例因子和非正交误差，这两种误差与转动速度有关，大的转动速度就会引起较大的传感器偏差，所以此时估计出来的零偏也是不可靠的。Zhou 等[17]使用的是系统级标定方法，将加速度计与陀螺仪一起标定，分析了系统模型下的可观测性，但是默认了非正交误差为反对称阵，且加速度计与陀螺仪的误差是耦合的，这种一致标定会使标定误差参数不准确。

为了实现 MEMS 三轴陀螺仪误差的快速、准确的标定，本文研究了一种基于两步修正法的标定方法。该方法首先采用文献[18]的中加速度计标定方法，该方法使用较少位置(六位置)的传感器数据，实现加速度计 12 参数较高精度的现场标定，标定结果是在正交系 b 系上，并且充分考虑了平台倾角误差。首先得到加速度计的 12 个标定参数和陀螺仪的比例因子，然后根据静态位置下，惯性传感器的速度和位置几乎无变化，得到伪量测信息，进行陀螺仪 6 参数的非正交误差标定。本文所研究的标定方法充分考虑了陀螺仪的误差参数，降低了 Kalman 滤波的系统维度，整个标定过程可以在 200 s 内完成，具有较高的精度，且不依赖转台设备。

1 三轴陀螺标定模型

考虑到 MEMS 三轴陀螺集成受工艺制造的影响，三轴传感器并非相互正交，即三轴之间存在非正交误差，导航解算是在其理想的正交导航坐标系下进行，所以载体系的非正交输出会引起系统误差。非正交关系如图 1 所示。X^b, Y^b, Z^b 为正交坐标坐标系 b 系，X^s, Y^s, Z^s 为传感器非正交坐标系 s 系，b 系到 s 系的变换矩阵记为 $\boldsymbol{A}_b^s$。根据图 1 示，定义 s 系中 X^s 轴可由 b 系的 X 轴绕 Y 轴转动，再绕转动后坐标系的 Z 轴转动得到；Y^s 轴可由 b 系的 Y 轴绕 X 轴转动，再绕转动后坐标系的 Z 轴转动得到；Z^s 轴可由 b 系的 Z 轴绕 X 轴转动，再绕转动后坐标系的 Y 轴转动得到。取 3 个转动矩阵的对应行，可以得到[17]：

$$\boldsymbol{A}_b^s = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{xy})\cos(\theta_{xz}) & \sin(\theta_{xz}) & -\cos(\theta_{xz})\sin(\theta_{xy}) \\ -\cos(\theta_{yx})\sin(\theta_{yz}) & \cos(\theta_{yx})\cos(\theta_{yz}) & \sin(\theta_{yx}) \\ \sin(\theta_{zy}) & -\cos(\theta_{zy})\sin(\theta_{zx}) & \cos(\theta_{zx})\cos(\theta_{zy}) \end{bmatrix} \tag{1}$$

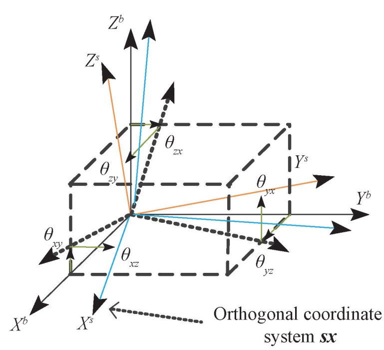


图 1 非正交关系示意图

Fig. 1 Non-orthogonal relation diagram

MEMS 三轴陀螺仪的误差通常还包括零偏和比例因子误差，考虑到 MEMS 陀螺仪本身是一种较低精度的陀螺，随机噪声是近似为零均值的噪声模型，积分后近似为 0，所以不再将随机噪声构建在标定模型中。将陀螺标定模型建模如下：

$$\boldsymbol{V}^s = \boldsymbol{S}_F(\boldsymbol{A}_b^s \boldsymbol{w}^b + \nabla^s) = \boldsymbol{S} \cdot \boldsymbol{w}^b + \nabla^v \tag{2}$$

其中，$\boldsymbol{V}^s$ 表示 s 系上三轴陀螺仪数据构成的矢量。$\boldsymbol{S}_F$ 为标度因数矩阵，它是一个对角阵，其对角线上的元

素 S_{Fx}、S_{Fy}、S_{Fz} 分别是陀螺仪 3 个轴的标度因数。$\boldsymbol{w}^b$ 表示与 $\boldsymbol{V}^s$ 相对应的 b 系的矢量,∇^s 表示 s 系上三轴零偏矢量,且与 $\boldsymbol{w}^b$ 具有相同量纲。∇^v 为∇^s 与 $\mathbf{S}_F$ 相乘的结果,根据上式有 $\boldsymbol{S}=\boldsymbol{S}_F\boldsymbol{A}_b^s$。

将 s 系下的三轴陀螺仪数据转换到正交系下的转换模型为:

$$\boldsymbol{w}^b=\boldsymbol{S}^{-1}(\boldsymbol{V}^s-\nabla^v)=(\boldsymbol{S}_F\boldsymbol{A}_b^s)^{-1}(\boldsymbol{V}^s-\nabla^v) \tag{3}$$

在本文算法中,基于反对称变换矩阵 $\boldsymbol{A}_b^s$ 的标定模型作为对比算法,本文的研究方法采用式(1)作为非正交误差的标定模型。

2　标定方法

2.1　静态零偏标定

当三轴陀螺仪在没有任何转动情况下,信号的输出即为传感器静态下的零偏。理想情况下陀螺仪保持静置,真实角速率应为 0 ,所以在转动实验下的静置时间内,陀螺仪的平均输出即为零偏。

$$\boldsymbol{b}_g=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\boldsymbol{V}^s \tag{4}$$

式中:N 为采样点数。

2.2　比例因子标定

根据文献[18]中提出的六位置参数修正法,其比例因子标定具有较好的一致性,本文中加速度计的标定和陀螺比例因子的标定采用此文献中的方法,在六个位置上分别绕垂直轴进行±360°转动,得到 6 个位置矢量,并按如下公式计算比例因子。

$$\tilde{S}_{Fx}=\frac{\boldsymbol{V}_{x1}(1)}{\boldsymbol{g}_L\cos(\beta)\cos(\theta_{xy})\cos(\theta_{xz})} \tag{5}$$

$$\tilde{S}_{Fy}=\frac{\boldsymbol{V}_{y1}(2)}{\boldsymbol{g}_L\cos(\beta)\cos(\theta_{yx})\cos(\theta_{yz})} \tag{6}$$

$$\tilde{S}_{Fz}=\frac{\boldsymbol{V}_{z1}(3)}{\boldsymbol{g}_L\cos(\beta)\cos(\theta_{zx})\cos(\theta_{zy})} \tag{7}$$

式中:$\boldsymbol{g}_L$ 为与当地纬度下的重力值,β 表示立方体框架与水平面的倾角[17]。

2.3　非正交误差标定

非正交误差也是影响陀螺精度的一个重要误差源,很多文献在标定过程中将其忽略或仅考虑上三角或下三角模型,这是不严谨的。因为对于 MEMS 低精度陀螺,自身的非正交性、传感器的安装误差在工艺上的处理有限。本文利用伪量测位置组合卡尔曼滤波系统级标定法对陀螺仪的非正交误差进行标定,系统的维度仅增加 6 个非正交参数,还可以减小比例因子标定不完全对非正交误差的影响。根据文献[17]中对非正交误差的可观测性分析,要使非正交误差可观,需要绕相应敏感轴进行转动,本文中的转位方案在下一节中介绍。系统模型的姿态误差方程使用小失准角模型,速度和位置误差方程不变,误差方程形式总结如下:

$$\dot{\boldsymbol{\phi}}=\boldsymbol{\phi}\times\boldsymbol{\omega}_{in}^n+\delta\boldsymbol{\omega}_{ie}^n+\delta\boldsymbol{\omega}_{en}^n-\boldsymbol{C}_b^n\delta\boldsymbol{\omega}_{ib}^b \tag{8}$$

$$\delta\dot{\boldsymbol{V}}=\boldsymbol{f}^n\times\boldsymbol{\phi}-(2\boldsymbol{\omega}_{ie}^n+\boldsymbol{\omega}_{en}^n)\times\delta\boldsymbol{V}^n+\boldsymbol{V}^n\times(2\delta\boldsymbol{\omega}_{ie}^n+\delta\boldsymbol{\omega}_{en}^n) \tag{9}$$

$$\delta\dot{\boldsymbol{P}}=\begin{bmatrix}\delta\dot{L}\\ \delta\dot{\lambda}\\ \delta\dot{h}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dfrac{\delta v_N^n}{R_m+h}-\dfrac{v_N^n}{(R_m+h)^2}\\ \dfrac{\sec L\delta v_E^n}{R_n+h}+\dfrac{v_E^n\sec L\tan L}{R_n+h}\delta L-\dfrac{v_E^n\sec L\delta h}{(R_n+h)^2}\\ \delta v_U^n\end{bmatrix} \tag{10}$$

本文组合导航中采用东北天地理坐标系为导航坐标系,对应的载体坐标系为右前上坐标系。由于存在非正交误差,定义 $\delta\boldsymbol{\omega}_{ib}^b=\boldsymbol{A}_s^b\delta\boldsymbol{\omega}_{ib}^s$,其中矩阵 $\boldsymbol{A}_s^b$ 为待标定的元素。定义状态估计量:

$$\boldsymbol{X}=[\boldsymbol{\phi}\quad\delta\boldsymbol{V}\quad\delta\boldsymbol{P}\quad\boldsymbol{K}]^{\mathrm{T}} \tag{11}$$

$$\boldsymbol{K}=[k_{12}\quad k_{13}\quad k_{21}\quad k_{23}\quad k_{31}\quad k_{32}]^{\mathrm{T}} \tag{12}$$

系统模型的数学表达式为:

$$\begin{bmatrix}\dot{\boldsymbol{\phi}}\\ \delta\dot{\boldsymbol{V}}\\ \delta\dot{\boldsymbol{P}}\\ \dot{\boldsymbol{K}}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{M}_{aa}&\boldsymbol{M}_{av}&\boldsymbol{M}_{ap}&\boldsymbol{M}_k\\ \boldsymbol{M}_{va}&\boldsymbol{M}_{vv}&\boldsymbol{M}_{vp}&\boldsymbol{0}_{3\times6}\\ \boldsymbol{0}_{3\times3}&\boldsymbol{M}_{vp}&\boldsymbol{M}_{pp}&\boldsymbol{0}_{3\times6}\\ &\boldsymbol{0}_{6\times15}&&\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{\phi}\\ \delta\boldsymbol{V}\\ \delta\boldsymbol{P}\\ \boldsymbol{K}\end{bmatrix} \tag{13}$$

$$\boldsymbol{M}_k=\boldsymbol{C}_b^n\begin{bmatrix}w_y&w_z&0&0&0&0\\ 0&0&w_x&w_z&0&0\\ 0&0&0&0&w_x&w_y\end{bmatrix} \tag{14}$$

在陀螺标定转动实验中,转位并没有改变传感器在运动导航坐标系的位置,所以量测模型采用位置不变原理提供伪量测,避免使用速度观测,是因为在转位过程中会有一定的向心加速度,速度并非为理想零值。

$$Z=\boldsymbol{P}_{INS}-\boldsymbol{P}_0=\boldsymbol{H}\boldsymbol{X}+v \tag{15}$$

$$\boldsymbol{H}=[\boldsymbol{0}_{3\times6}\quad\boldsymbol{I}_{3\times3}\quad\boldsymbol{0}_{3\times6}] \tag{16}$$

2.4　标定算法步骤

两步修正法标定 MEMS 三轴陀螺仪,首先是利用六位置法采集沿各个垂直轴的静止数据和旋转数据,静止数据标定惯性单元中加速度计的确定性误差和陀螺仪的零偏,旋转数据用来标定陀螺仪的比例因子。将一步修正中的已标定误差进行补偿,辅助非正交误差的标定。在系统级模型中只含有非正交误差,大大降低了系统模型的可观测性要求,算法的计算量更小,滤波收敛时间更快。算法流程如图 2 所示。

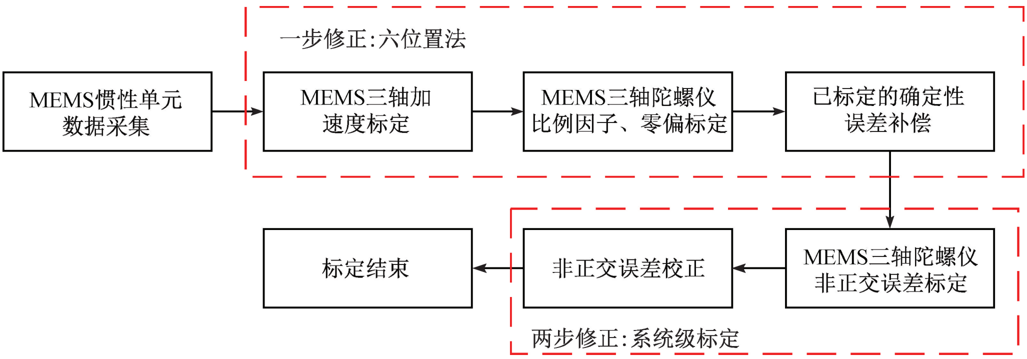


图 2 标定算法流程

Fig. 2 Calibration algorithm flow chart

3 仿真与实验

为了证明本文所提出算法的实用性,根据 1,2 部分的介绍,进行了仿真实验和实际传感器测试。在仿真实验中,首先设计了满足可观测性的旋转方案,产生真值数据,添加预先设定的传感器误差,并设计了蒙特卡洛实验测试比例因子和非正交误差的标定精度和稳定性。在实际实验中,旋转方案与仿真实验一致,分析了标定前后惯性数据做纯惯性导航的水平姿态精度。

为了证明本文陀螺仪标定方案的有效性与优越性,与文献[17]中的方法进行对比,下文中称为“传统方法”。该文献中把比例因子和非正交误差的标定同时构建系统模型,且默认非正交误差是一个三维反对称阵,这样加大了系统可观测性的要求,同时比例因子的收敛性会影响非正交误差的标定。

3.1 仿真实验

为了在仿真实验中充分模拟实际加速度计的测试环境,引入了平台倾角误差 1.5°。按照如图 3 所示的位置进行静止和沿垂直轴正逆向转动。1、3、5 分别表示沿垂直轴逆时针转 360°,2、4、6 分别表示沿顺时针转 360°。每个位置分别采集 10 s 时间,仿真频率设置 200 Hz。待标定的参数真值设置如表 1 所示。

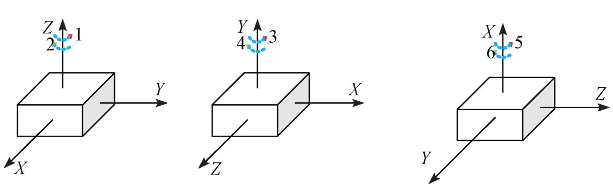


图 3 转位方案

Fig. 3 Rotation schemet

本文中的两步修正法,先标定加速度计确定性误差、陀螺仪比例因子、静态零偏,再标定陀螺仪非正交误差。

表 1 仿真真值参数设置

Table 1 Simulation truth parameter setting

轴	静态零偏/(°·s^{-1})	比例因子	非正交误差/(°)
x	0.5	0.993 91	-0.45;0.65
y	0.5	1.007 41	-0.45;0.65
z	0.5	1.005 89	-0.45;0.65

根据标定结果计算的相对误差如表 2 所示。从表 2 可以看出,本文所研究的算法比例因子相对误差具有较好的一致性,且非正交误差参数标定的结果总体上比传统方法的相对误差要小。

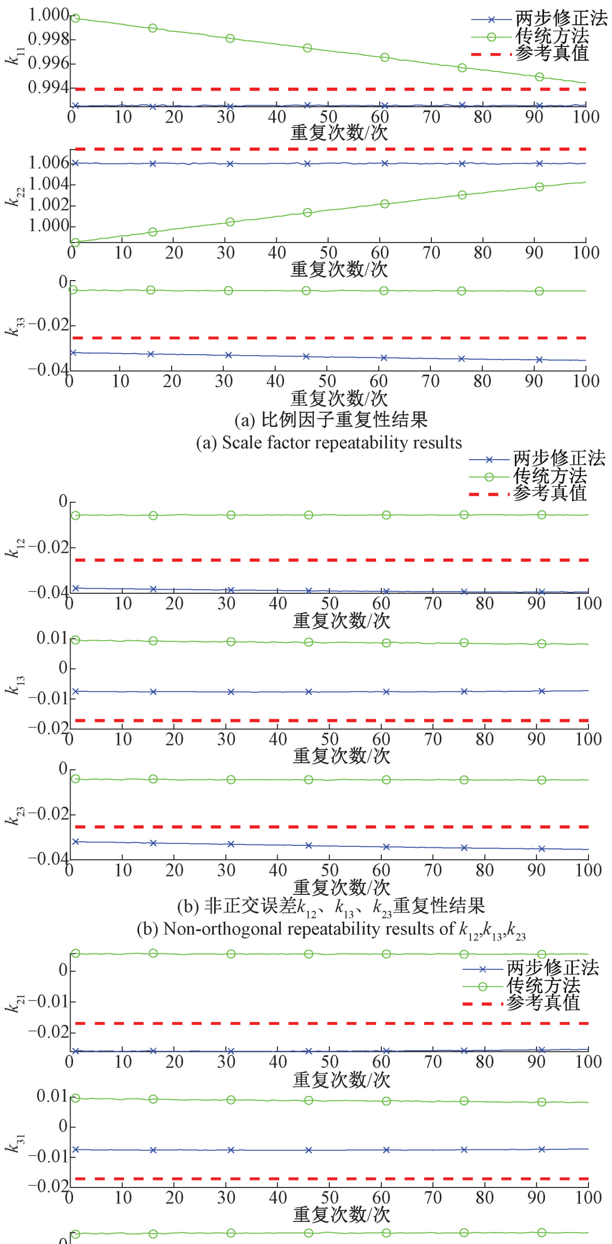
表 2 标定结果相对误差值

Table 2 The relative error of calibration results %

标定参数	相对误差	
	文献方法	本文法
θ_{xy}	0.593 023	-0.133 59
θ_{xy}	-0.877 74	-0.143 79
θ_{xy}	-0.224 31	-0.140 78
θ_{xy}	-121.941 0	48.119 08
θ_{xz}	-45.289 3	-56.438 60
θ_{yx}	-67.045 9	52.559 40
θ_{yz}	-117.153 0	25.777 44
θ_{zx}	-137.366 0	86.662 31
θ_{zy}	-74.619 7	40.068 18

为了进一步探究本文方法中比例因子和非正交误差标定方法与传统方法的差异,进行了 100 次的蒙特卡洛仿真实验,水平倾斜角随重复性实验线性变化,重复性实验结果如图 4 所示。

通过计算重复性实验标定结果误差的均值和标准差,统计结果如表 3 所示,可以发现,本文所提出的算



(a) 比例因子重复性结果
(a) Scale factor repeatability results

(b) 非正交误差k_{12}、k_{13}、k_{23}重复性结果
(b) Non-orthogonal repeatability results of k_{12},k_{13},k_{23}

(c) 非正交误差k_{21}、k_{31}、k_{32}重复性结果
(c) Non-orthogonal repeatability results of k_{12}, k_{13}, k_{23}

图 4　重复性实验结果

Fig. 4　Repeatability experiment result

法标定结果误差均值更小,说明标定结果更接近设定的真值,比例因子的标准差比传统方法小两个数量级,且具有较好的一致性,说明六位置法标定比例因子比系统级标定方法更好。非正交误差的标准差总体上也比传统方法更小。由于零偏标定方式一致,所以不再进行统计比较。

表 3　重复性实验的统计值

Table 3　Statistics of repeated experiments

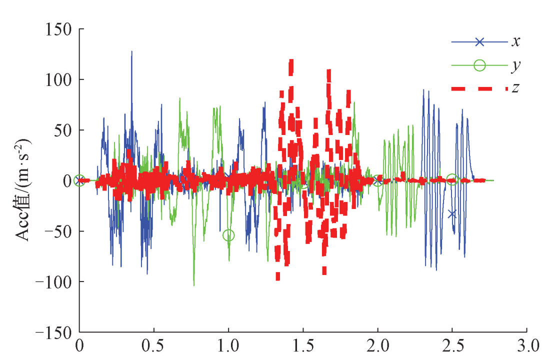
误差参数	本文算法		对比文献算法	
	均值	标准差	均值	标准差
k_{11}	−0. 001 35	3.31×10^{-5}	0. 003 183	0. 001 553
k_{12}	−0. 013 41	0. 000 526	0. 019 82	8.10×10^{-5}
k_{13}	0. 009 595	0. 000 107	0. 025 948	0. 000 378
k_{21}	−0. 008 85	0. 000 185	0. 022 526	8.10×10^{-5}
k_{22}	−0. 001 37	3.39×10^{-5}	−0. 005 87	0. 001 676
k_{23}	−0. 008 37	0. 001 019	0. 020 927	0. 000 137
k_{31}	−0. 021 4	0. 000 43	0. 016 262	0. 000 378
k_{32}	−0. 008 99	0. 001 062	0. 021 611	0. 000 137
k_{33}	−0. 001 37	3.72×10^{-5}	−0. 002 69	0. 000 216

3. 2　实际实验

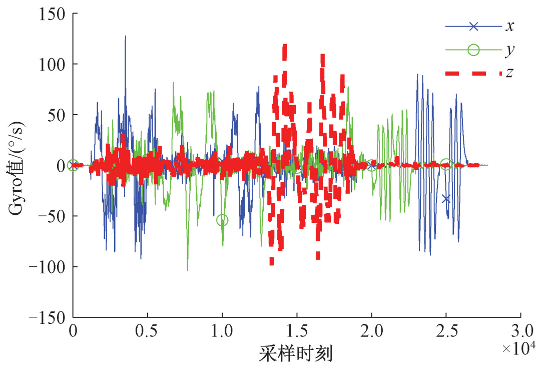
在实际实验中,本文采用了消费级的 MEMS 传感器 MPU9250 进行实验论证,这是一款 9 自由度的惯性传感器,包括三轴加速度计,三轴陀螺仪,三轴磁力计。实验装置如图 5 所示,实验中将待标定的传感器固连在一个立方体框架上,将立方体框架放置于大理石平台上,采样频率 200 Hz,采集数据时温度有 0. 5℃～1℃的变化,忽略温度对标定实验的影响,采集到传感器测试数据如下图 6 所示。

图 5　实验装置与数据采集

Fig. 5　Experimental equipment and data acquisition



(a) 加速度计数据
(a) Accelerometer data



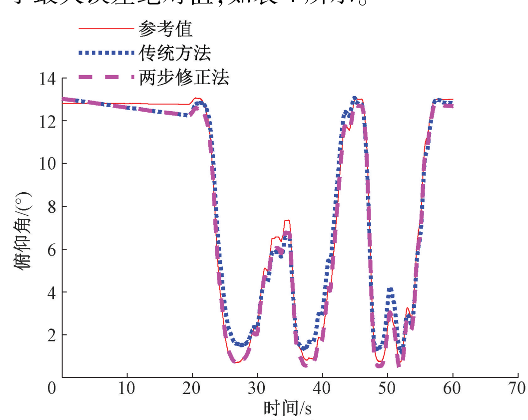
(b) 陀螺仪数据

(b) Gyroscope data

图 6 MPU9250 测试数据

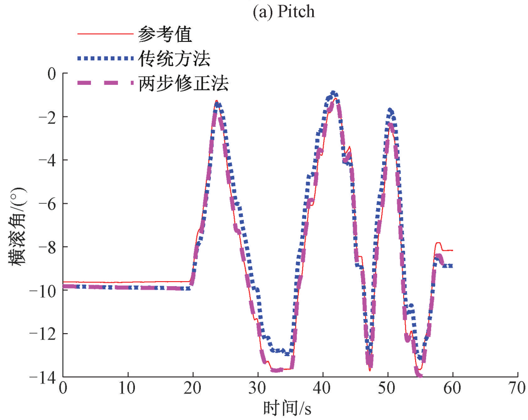
Fig. 6 Test data of MPU9250

实际实验中值得注意的是，由于 MEMS 陀螺仪无法敏感到地球自转速度，所以无法使用角速度模值进行比较。所以，本文中的参考基准均采用后处理输出的结果。后处理的水平姿态输出结果接近高精度导航设备，可以作为参考基准。分别利用两步修正法与传统方法的标定结果对测试数据进行校正，然后进行纯惯性导航，分析其水平姿态角与参考基准的误差，其结果如图 7 所示。并计算了最大误差绝对值，如表 4 所示。



(a) 俯仰角

(a) Pitch



(b) 横滚角

(b) Roll

图 7 不同算法的纯惯性结果

Fig. 7 Pure inertia results of different algorithms

表 4 最大误差绝对值

Table 4 Absolute maximum error (°)

姿态角	本文方法	传统方法
俯仰角	0. 624 846	1. 250 629
横滚角	0. 670 062	1. 382 615

为了分析标定过程中 Kalman 滤波非正交误差的收敛情况，图 8 和 9 是非正交误差的状态估计值以及 P 阵对角阵均方值图，可以发现，非正交误差 6 个参数均在对应轴的旋转激励之后立即得到较好的收敛。

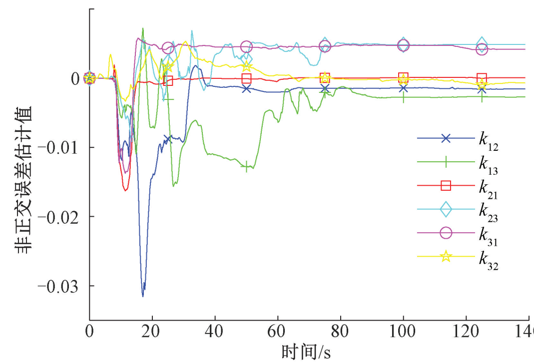


图 8 非正交误差状态估计值

Fig. 8 Non-orthogonal error state estimate

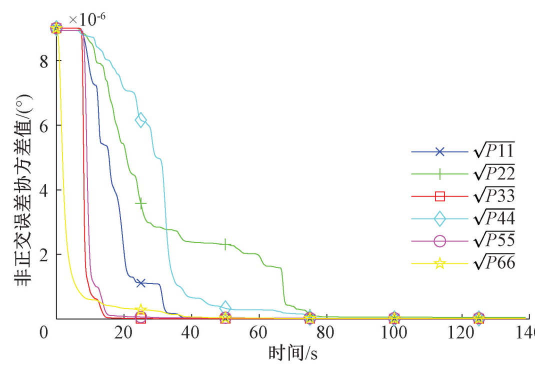
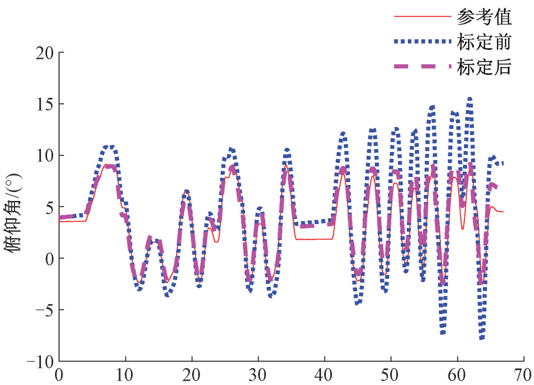


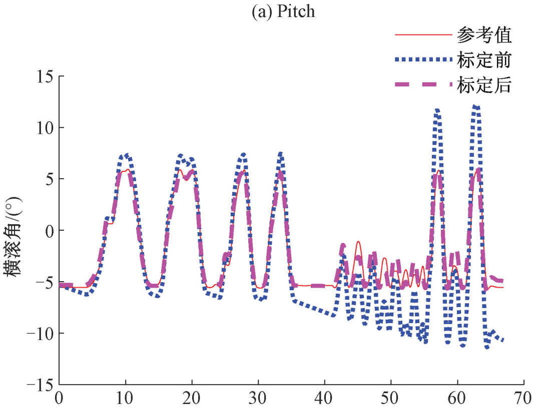
图 9 P 阵对角均方值

Fig. 9 Diagonal mean square value of P matrix

最后，利用本文方法使用标定前后的陀螺数据进行纯惯性导航，在实验中采集旋转角度变化较大的 65 s 数据，这与图 7 是同一实验环境，但不是同一次的数据。这符合实际导航应用中姿态变化大的情况，也可以更加明显的看出标定前后陀螺误差参数对水平姿态角输出的影响. 其结果如下图 10 所示，可以发现，标定后的数据进行 65 s 纯惯性导航输出的水平姿态角更加接近参考值。这说明本文研究方法对三轴陀螺仪进行标定是可行的。



(a) 俯仰角
(a) Pitch



(b) 横滚角
(b) Roll

图 10　纯惯性导航姿态结果

Fig. 10　Pure inertial navigation attitude results

4　结　　论

本文针对目前已有的三轴陀螺仪标定方法,依赖于昂贵的转台设备或标定参数不完全的问题,提出了一种了基于两步修正法的 MEMS 三轴陀螺仪标定方法。该方法首先使用六位置法对加速度计 12 参数模型、三轴陀螺仪比例因子、三轴陀螺仪静态零偏进行标定补偿,然后利用已校正的数据辅助三轴陀螺仪非正交误差模型建模,进行系统级标定。

为了验证所提方法的有效性,进行了 100 次重复性标定,测试表明本文算法所获得的非正交误差均值接近 1%,标准差小于 0.1%;比例因子误差均值小于 0.14%,标准差小于 0.004%,且具有很好的一致性。消费级 MEMS 传感器 65 s 纯惯性导航姿态更新结果中,该标定方法的俯仰角误差精度可以达到 0.624°,横滚角误差精度可以达到 0.67°。本文所提出的标定方法,不仅具有较高的标定精度,较低的成本,也节省了标定时间,具有实用价值。

参考文献

[1] SKOG I, HÄNDEL P. Calibration of a MEMS inertial measurement unit[C]. XVII IMEKO World Congress, 2006: 1-6.

[2] SYED Z F, AGGARWAL P, GOODALL C, et al. A new multi-position calibration method for MEMS inertial navigation systems [J]. Measurement Science & Technology, 2007, 18(7): 1897-1907.

[3] ROHAC J, SIPOS M, SIMANEK J. Calibration of low-cost triaxial inertial sensors[J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2015, 18(6): 32-38.

[4] GHANIPOOR F, HASHEMI M, SALARIEH H. Toward calibration of low-precision MEMS IMU using a nonlinear model and TUKF[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(8): 4131-4138.

[5] SONG L, LU M, DUAN Z, et al. Multi-position iterative recursive calibration algorithm of fiber optic gyroscope[J]. Optical Engineering, 2021, 60(3): 035107.

[6] 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 and technology, 2008, 19(8): 085202.

[7] FROSIO I, PEDERSINI F, BORGHESE N A. Autocalibration of triaxial MEMS accelerometers with automatic sensor model selection[J]. IEEE Sensors Journal,2012,12(6):2100-2108.

[8] FANG J CH, SUN, et al. A novel calibration method of magnetic compass based on ellipsoid fitting[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2011, 60(6): 2053-2061.

[9] 龙达峰, 刘俊, 张晓明,等. 基于椭球拟合的三轴陀螺仪快速标定方法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(6): 1299-1304.
LONG D F, LIU J, ZHANG X M, et al. Triaxial gyroscope fast calibration method based on ellipsoid fitting[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(6):1299-1304.

[10] QURESHI U, GOLNARAGHI F. An algorithm for the in-field calibration of a MEMS IMU[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(22): 7479-7486.

[11] YE L, GUO Y, SU S W. An efficient autocalibration method for triaxial accelerometer[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(9): 2380-2390.

[12] 王勇军,李智,李翔. 无人机磁惯导系统中陀螺仪的叉积标定算法[J]. 仪器仪表学报,2020,41(4):14-23.
WANG Y J, LI ZH, LI X. Cross product calibration method for gyroscope in magneto-inertial navigation system of UAV [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020,41(4):14-23.

[13] LI Y, GEORGY J, NIU X, et al. Autonomous calibration of MEMS gyros in consumer portable devices[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(7): 4062-4072.

[14] MIKOV A, REGINYA S, MOSCHEVIKIN A. In-situ gyroscope calibration based on accelerometer data[C]. 2020 27th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS), IEEE, 2020: 1-5.

[15] JURMAN D, JANKOVEC M, KAMNIK R, et al. Calibration and data fusion solution for the miniature attitude and heading reference system[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2007,138(2):411-420.

[16] 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.

[17] ZHOU Q, YU G, LI H, et al. A novel mems gyroscope in-self calibration approach [J]. Sensors, 2020, 20(18):5430.

[18] XU T, XU X, XU D, et al. A novel calibration method using six positions for MEMS triaxial accelerometer[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70:1-11.

作者简介

邹泽兰,2019 年于衡阳师范学院获得学士学位,现为苏州大学电子信息学院硕士研究生,主要研究方向为 MEMS 惯性传感器的标定与基于 MEMS 惯性传感器的组合导航.
E-mail: zelanzou@163.com

Zou Zelan received her B. Sc. degree from Hengyang Normal University in 2019. Now, She is a master student at the School of Electronic Information, Soochow University. Her main research interests are calibration of MEMS inertial sensors and integrated navigation based on MEMS inertial sensors.

赵鹤鸣(通信作者),1982 年毕业于苏州大学物理系,1984 年至 1985 年在清华大学电子工程系助教进修班学习,1988 年至 1990 年在德国慕尼黑工业大学进修并合作研究。现为苏州大学电子信息学院教授,博士生导师,主要研究方向为语音分析和处理、智能计算、数字信号处理系统。
E-mail: hmzhao@suda.edu.cn

Zhao Heming (Corresponding author), graduated from Department of Physics, Soochow University in 1982, studied in the Assistant Teaching Program, Department of Electronic Engineering, Tsinghua University from 1984 to 1985, and studied and attended cooperative research in Technical University of Munich, Germany from 1988 to 1990. Now, he is a professor and doctoral supervisor in School of Electronic Information, Soochow University. His main research interest includes voice analysis and processing, intelligent calculation, digital signal processing system.