文章编号:1004-2474(2018)05-0780-04

基于 MEMS 加速度计的优化九位置校准算法

刘 宇1,李 博1,邸 克1,杨 磊1,范嗣强2

(1. 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;2. 重庆师范大学 物理与电子工程学院,重庆 401331)

摘 要:针对传统的加速度计标定法对高精度转台依赖高的问题,提出一种基于微机电系统(MEMS)加速度 计的优化九位置标定算法。该算法考虑加速度计的非线性因子和电子串扰效应,通过采集 9 个位置的静态加速度 计输出数据,即可对加速度计零偏、刻度因子和安装误差等系数进行高精度快速校准,摆脱了对传统转台的依赖。 实验结果表明,基于 MEMS 加速度计的九位置标定算法有效解决了加速度计非线性问题,减低了电子串扰效应对 加速度计的影响,加速度计的误差精度由 8.48×10⁻³g(g=9.8 m/s²)减少到 5.1×10⁻⁴g,证明该九位置标定算法 的可行性和有效性。

关键词:加速度计;惯性测量系统;标定算法;九位置标定;误差精度

中图分类号:TN384 文献标识码:A **DOI:**10.11977/j.issn.1004-2474.2018.05.030

Optimization of Nine-position Calibration Algorithm Based on MEMS Accelerometer

LIU Yu¹, LI Bo¹, DI Ke¹, YANG Lei¹, FAN Siqiang²

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

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

2. College of Physics and Electronic Engineering, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: In view of the high dependence of the traditional accelerometer calibration method on high precision turntable, an optimized nine position calibration algorithm based on MEMS accelerometer is proposed in this paper. The nonlinear factor and electronic crosstalk effect of the accelerometer are taken into consideration, and by collecting the static accelerometer output data of nine positions, the zero bias, scale factor and installation error of the accelerometer can be quickly and accurately calibrated, for which the dependency on the traditional turntable is eliminated. The experimental results show that the nonlinear problem of accelerometer has been effectively solved by the nine-position calibration algorithm based on MEMS accelerometer is reduced from 8.48 $\times 10^{-3} g(g=9.8 \text{ m/s}^2)$ to 5. $1 \times 10^{-4} g$, which proves the feasibility and effectiveness of the nine-position calibration algorithm.

Key words: accelerometer; inertial measurement system; calibration algorithm; nine-position calibration; error accuracy

0 引言

微惯性导航系统(MINS,简称"微惯导")是一种基于微机电系统(MEMS)技术的微型惯导系统^[1]。微惯性导航所使用的传感器主要是基于 MEMS技术的陀螺仪和加速度计。其中 MEMS 加 速度计的测量精度对惯导系统整体性能影响较 大^[2]。而 MEMS 加速度计的测量精度受安装误差、 零偏和刻度因子的精度的影响,从而影响其应用范 围,因此需通过建立误差模型对 MEMS 加速度计进 行精确标定。

目前 MEMS 加速度计校准方法主要有:

 1)张红字等^[3]采用了一种6位置加速度计标 定方法,方法简单,可行性高,实际使用时无需转台, 但该方法精度较低。

2) 刘白奇等^[4]采用改进的动静结合的惯性测量系统(INS)的高精度标定方法,虽然提高了标定精度,但该方法需精密转台提供实验平台,在无转台的情况下,无法应用该方法进行精确标定。

3) 陈剑^[5]采用了一种十二个位置的静态加速

收稿日期:2017-10-12

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,主要从事传感器件与系统的研究。E-mail:liuyu@cqupt.edu.cn。通信作者: 范嗣强,副教授,硕士生导师,主要从事光电子器件与传感系统的研究。E-mail:mikefan111@163.com

度计标定方法,该方法无需依赖高精度转台,但需两 次校正零偏,操作复杂。

4) Jafari M 等^[6] 采用双卡尔曼滤波法分别对 MEMS 陀螺和加速度计标定,并使用预测误差最小 化的建模方法对卡尔曼滤波器中的零偏稳定性和随 机游走噪声进行建模,但该算法计算复杂,且对不同 传感器需设置不同滤波参数。

为使 MEMS 加速度计的校准更快速简易,不受 转台精度的影响,本文提出了一种九位置加速度误 差补偿模型,使用高斯-牛顿非线性优化法计算刻度 因子、零偏和非正交误差,对加速度计进行标定补 偿。通过实验验证,该方法提出的 MEMS 加速度计 九位置校准法能有效解决加速度计非线性问题,减 低了电子串扰效应对加速度计的影响,加速度计的 精度由 8.48×10⁻³ $g(g=9.8 \text{ m/s}^2)$ 减少到 5.1× $10^{-4}g$,降低了 1 个数量级。

1 九位置误差补偿模型

图1为九位置误差补偿模型。



图 1 MEMS 惯性加速度计九位置误差模型

误差模型式为

$$A = S(V - O)$$

式中: $V^{T} = \begin{bmatrix} v_{x} & v_{y} & v_{z} \end{bmatrix}$ 为加速度计校准前各轴 的输出数据; $A^{T} = \begin{bmatrix} a_{x} & a_{y} & a_{z} \end{bmatrix}$ 为加速度计矢量, 是加速度计校准后各轴的实际输出; S, O分别为加 速度计比例因子和零偏,且

(1)

$$\boldsymbol{S} = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{zx} & S_{zy} & S_{zz} \end{bmatrix}$$
(2)
$$\boldsymbol{O} = \begin{bmatrix} O_x \\ O_y \\ O \end{bmatrix}$$
(3)

S的对角线元素表示 3 个轴的比例因子,S 的 其他元素称为非正交因子,它是描述由 MEMS 加速 度计非正交引起的串扰效应。在理想情况下,非正 交因子等于 0,但实际情况中,其值可达加速度测量 范围的 2%,严重影响加速度计测量精度。

2 加速度计九位置标定算法原理 理想静止条件下,加速度计的模值等于重力加 速度g,即

 $\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} = g \tag{4}$

为计算 S 的 9 个独立参数,将 MEMS 加速度计 放置在 9 个随机不同的位置并保持静止。

定义 MEMS 加速度计平方误差为 e_k^2 ,它是由加速度计的各轴实际输出的平方值之和与第 k 方向的地球重力加速度平方的差,即

$$e_{k}^{2} = a_{x}^{2} + a_{y}^{2} + a_{z}^{2} - g^{2} = \sum_{i=x,y,z} \left\{ \sum_{j=x,y,z} \left[S_{ij} \cdot (V_{j,k} - O_{j}) \right]^{2} \right\} - g^{2}$$
(5)

式中: $V_{j,k}$ 为第 k 个方向 MEMS 加速度计 j 轴的输 出值; $S_{xy} = S_{yx}$, $S_{xz} = S_{zx}$, $S_{yz} = S_{zy}$ 。通过不断积累 叠加 MEMS 加速度计的误差 e_k^2 , 再取均值得到平均 误差 E 为

$$E = E(O_x, O_y, O_z, S_{xx}, S_{yy}, S_{zz}, S_{xy}, S_{xz}, S_{yz}) = \sum_{k=1}^{N} e_k^2 / N$$
(6)

式(6)是关于加速度计参数 *S* 和 *O* 的非线性方程,当加速度计的累积均方误差 *E* 最小化时来确定 传感器的误差参数。本文采用高斯-牛顿非线性优 化方法来计算该参数,该方法是一个迭代优化程序, 保证二次收敛性。根据传感器芯片手册确定初始值 估计,迭代更新方程为

 $x^{t+1} = x^{t} - \alpha \cdot H^{-1}(x^{t}) \cdot J(x^{t})$ (7) 式中: $\alpha < 1$ 为阻尼系数; x^{t} 为第 t 次迭代的未知向 量,包含零偏向量和比例因子矩阵的 9 个独立元 素,即

$$\mathbf{x}^{t} = \begin{bmatrix} x_{1}, & \cdots, & x_{9} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} O_{x} & O_{y} & O_{z} & S_{xx} & S_{yy} & S_{zz} & S_{xy} & S_{xz} & S_{yz} \end{bmatrix}^{t}$$

$$(8)$$

定义 $J(x^{t})$, $H(x^{t})$ 分别为误差E的雅可比矩阵 和海森矩阵,即

$$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{x}^{t}) = \left[\frac{\partial E}{\partial x_{1}}, \cdots, \frac{\partial E}{\partial x_{9}}\right]$$
(9)

$$\mathbf{H}(x^{t}) = \left\{ h_{ij} = \frac{\partial^{2} E}{\partial x_{i} \partial x_{j}} \right\}$$
(10)

在每次迭代计时通过线性搜索程序来计算。当 满足以下收敛准则时停止迭代:

$$\max\left\{ \left| \frac{x_l^t - x_l^{t-1}}{\left[(x_l^t + x_l^{t-1}) \right]/2} \right| \right\} < \varepsilon$$
(11)

式中 ϵ 为阈值,根据经验设置 $\epsilon = 1.5 \times 10^{-6}$ 。

经计算,通过少于10次迭代则满足收敛条件,

确定参数的最终值,并通过式(5)、(6)进行线性化评估参数的准确度。

图 2 为加速度计九位置误差补偿模型流程。



图 2 九位置标定法流程图

3 实验流程与结果分析

3.1 实验平台

为验证九位置误差补偿模型可精确反映加速度 计的输出特性,选用 MPU6050 和 902E-1 型的高精 度双轴转台为实验平台,如图 3 所示。



(a) 双轴测试转台

(b) MPU6050测试模块

图 3 双轴测试转台与 MPU6050

3.1.1 双轴电动转台

902E-1 型双轴测试转台主要由机械台体和测 控系统组成,主要适用于惯性元部件、惯导系统的静 态测试和标定。双轴转台在标定过程中的作用主 要有:

1) 保证标定过程中的加速度计的相对静止。

2) 九位置标定的检验提供验证平台。

3.1.2 MPU6050

MPU6050集成 MEMS 三轴陀螺仪和 MEMS 三轴加速度计及内置数据运动处理器,运行电压在 2.375~3.460 V,拥有一个外接辅助 IIC 接口,且辅 助 IIC 接口与 HMC5883L 相连,其 MPU6050 相关 的特性如表 1 所示。

表 1	MPU6050 性能表	
参数	条件	典型值
	ACCEL_FS=0	± 2
满量程范围/g	ACCEL_FS=1	± 4
	ACCEL_FS=2	± 8
	ACCEL_FS=3	± 16
	ACCEL_FS=0	16 384
刻度因子敏感度/	ACCEL_FS=1	8 192
(LSB/g)	ACCEL_FS=2	4 096
	ACCEL_FS=3	2 048
非线性/%	最佳直线	\pm 0.5
交叉轴灵敏度/%		± 2
宽容度/mg	器件级,各轴向	± 25
	板级,各轴向	± 50

注:表中 ACCEL_FS 为 MPU6050 中加速度设置标志 位,LSB 为二进制中最低有效位。

3.2 实验过程

3.2.1 九位置法的标定方案

标定方案可随机确定 9 个位置完成标定,保证 实验的易操作性和验证实验结果正确性,其中前面 6 个位置为传统的六位置法中 6 个位置。另外 3 个 位置分别为东-北-天,西-地-南及天-西-南分别以一 定的角度倾斜固定在转台上面。位置 7:在东-北-天 的基础上以北为旋转轴逆时针旋转 45°。位置 8:在 西-地-南的基础上以南为旋转轴逆时针旋转 45°。 位置 9:在天-西-南的基础上以西为旋转轴顺时针旋 转 45°,如图 4 所示。九位置的各向重力加速度如表 2 所示。



² (c) 位置9 图 4 加速度计倾斜状态数据采集

表 2 九位置各方向重力加速度

位置	坐标轴取向		重力加速度/g			
	x 轴	y 轴	<i>z</i> 轴	x 轴	y 轴	<i>z</i> 轴
1	东	天	南	0	-1	0
2	西	地	南	0	1	0
3	东	北	天	0	0	-1

续表

位置	坐标轴取向		重力加速度/g			
	x 轴	y 轴	2 轴	x 轴	y 轴	2 轴
4	南	西	地	0	0	1
5	地	东	南	1	0	0
6	天	西	南	-1	0	0
7				0	0.707	0.707
8				0	-0.707	-0.707
9				0.707	0	0.707

3.3 实验结果与分析

采集九种位置方式下,30 s内的三轴 MEMS 加 速度计静止数据,并取其平均值,得到九组加速度计 测量值,如表 3 所示。将采集的加速度计各位置的 值取平均值后代入加速度计九位置误差模型中,求 取误差参数,再将误差参数代入各自补偿模型中,得 到加速度计校正后的输出值。

表 3 采集加速度计九位置未校准值

位罢	加速度/(m・s ⁻²)			
	x 轴	y 轴	2 轴	
1	-0.067 1	-9.815 6	-0.075 5	
2	0.083 2	9.787 1	0.074 1	
3	9.774 2	-0.0457	0.051 5	
4	-0.141 9	-0.086 6	9.774 5	
5	-9.859 9	-0.0654	-0.046 5	
6	-0.0327	9.743 6	-0.0722	
7	0.034 8	6.881 5	6.870 4	
8	-0.104 1	-6.9371	-6.945 1	
9	6.891 2	0.014 2	6.908 2	

选择放置位置2的数据进行修正,得到标定前、 后各轴加速度计的输出结果如图5所示。



MEMS加速度计通过九位置标定模型后,由表 3 和图 4 可知,九位置标定模型对加速度计测量精 度有所提高,标定前均值相差 8.31×10^{-2} m/s²,而 九位置敏感轴的数据跟理论值均值相差 $5.00 \times$ 10^{-3} m/s²,精度提升了 1 个数量级,且图 5 也说明 经过九位置校准后的加速度计测量值更接近真实理 论值。其他两轴的数据也更接近理论值,减少了非 线性误差和串扰效应带来的误差。

实验表明,九位置法对 MEMS 加速度计的校正 能进一步优化加速度计性能。

4 结束语

本文在加速度计传统六位置标定算法的基础上 考虑了加速度计的非线性误差和各轴间非正交引起 的串扰效应,提出了加速度计九位置标定法。实验 结果表明,九位置误差补偿模型和标定方法能有效 减少加速度计非线性问题,减低了电子串扰效应对 加速度计的影响,加速度计的测量值更接近理论值, 加速度计的误差精度由 8.48×10⁻³g 减少到 5.1× 10⁻⁴g,证明了九位置标定算法的可行性和有效性。

参考文献:

- [1] CHIANG K W, DUONG T T, LIAO J K, et al. On-line smoothing for an integrated navigation system with low-cost MEMS inertial sensors[J]. Sensors, 2012, 12 (12):17372-17389.
- [2] PODDAR S, KUMAR V, KUMAR A. A comprehensive overview of inertial sensor calibration techniques
 [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2017, 139(1): 011006.
- [3] 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]. 计测技术,2009(3):11-13.
 ZHANG Hongyu, YE Xinsheng. A modified calibration model of IMU accelerator and rapid calibration method [J]. Metrology & Measurement Technology, 2009 (3):11-13.
- [4] 刘白奇,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.

LIU Baiqi, FANG Jiancheng. Modified hybrid calibration method for IMU without orientation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008(6): 1250-1254.

 [5] 陈剑,孙金海,李金海,等.惯性系统中加速度计标定 方法研究[J].微电子学与计算机,2012,29(8): 130-133.
 CHEN Jian,SUN Jinhai,LI Jinhai, et al. The research

of calibration method of accelerator in inertial navigation system[J]. Microelectronics & Computer, 2012, 29(8):130-133.

[6] JAFARI M, SAHEBJAMEYAN M, MOSHIRI B, et al. Skew redundant MEMS IMU calibration using a Kalman filter[J]. Measurement Science and Technology, 2015, 26(10): 105002.