

三轴数字 MEMS 加速度计现场标定方法*

彭孝东^{1,2}, 张铁民¹, 李继宇¹, 闫国琦¹

(1. 华南农业大学工程学院 广州, 510642) (2. 机器人学国家重点实验室 沈阳, 110016)

摘要 微机电系统(micro electro mechanical systems,简称 MEMS)加速度传感器作为低成本惯性测量单元在物体姿态监测中有着广泛应用。根据三轴数字加速度传感器的输出数学模型,详细推导了如何计算数学模型中标度因数、安装误差系数以及零偏值。提出一种基于长方体的六位置简单标定方法,对比三轴转台精确标定结果表明六位置简单标定法简单易行,精度较高,易于单片机实现,适合不具备三轴转台的场所,且该方法对 MEMS 三轴数字加速度计的校准具有很好的通用性。

关键词 微机电系统; 加速度计传感器; 标定; 转台

中图分类号 V241.4; U666.12

引言

农业机械的自动导航控制与变量作业实施中,实时检测与获取农业机械的姿态角对农业机械精确导航及变量作业控制具有重要意义^[1]。对物体姿态角的监测常用到电子罗盘、陀螺仪以及加速度计等惯性测量单元进行组合监测,采用多传感器融合技术来获取物体的偏航角、俯仰角及翻滚角信息^[2-3]。惯性测量单元在使用前必须对其进行标定校准实验,补偿各种误差以提高检测精度。惯性传感器的标定通常是在三轴转台上来完成的,高精度三轴转台价格昂贵,体积笨重,只限于实验室使用。普通用户和一般的实验室很少具备这类精密昂贵的专用实验设备,很少有条件对此类传感器做精确标定,因此需要一种简单方便、快捷有效的标定校准方法。

根据 MEMS 三轴数字加速度计的特点,利用普通气泡水平仪、六面体盒状物实现了加速度计的六位置现场简易标定,并通过三轴转台实验验证了其准确性及精度,证明了该标定法简单快速,准确可靠,特别适合于现场标定。

1 数字加速度计误差与数学模型

根据误差产生机制不同,三轴加速度计误差主要分为零位偏差、标度系数误差、安装误差及轴间非正交误差等^[4-5]。对 MEMS 三轴加速度计传感器来

说,零位误差和标度系数误差是影响其精度的主要因素,且随时间环境的变化而变化,安装误差及轴间非正交误差在长时间范围内不会产生较大的变化,并可以通过提高安装工艺及制造工艺来减小此类误差的影响。轴间非正交误差造成影响和安装误差相似,可将其统一划归为安装误差。因此,根据上述 MEMS 三轴加速度计误差形成的特点,将传感器输出误差数学模型^[5-10]表示为

$$\begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & S_y & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & S_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: D_x, D_y, D_z 为加速度的真实值; M_x, M_y, M_z 为传感器测量值; B_x, B_y, B_z 为传感器的零偏; S_x, S_y, S_z 为传感器的比例因子; $k_{ij} (i=x, y, z; j=x, y, z; i \neq j)$ 为传感器安装误差系数。

加速度传感器的标定就是确定数学模型中的零偏、比例因子、安装误差系数,该模型中共有 12 个未知参数。随着安装工艺和制作工艺的提高,安装误差所带来的影响很小,相对于比例因子和零偏所造成的误差来说是可以忽略的小量,因此现场简单标定可以只对比例因子与零偏进行标定,则传感器的误差数学模型简化为

$$\begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 \\ 0 & 0 & S_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

* 国家高技术研究发展计划(“八六三”计划)资助项目(2013AA102303);机器人学国家重点实验室开放课题资助项目(2012-O02)

收稿日期:2013-02-27;修回日期:2013-07-12

2 数字加速度计标定测试方法

实验用的加速度传感器是 ADI 公司新推出的三轴数字加速度计 ADXL345,一款主要应用于消费电子的微型惯性器件,具有 3.9 mg/LSB(least significant bit,简称 LSB)最低有效位的灵敏度,数据输出频率高达 3 200 Hz。该传感器采用集成式存储器管理系统,有可选的 32 级先进先出(first input first output,简称 FIFO)缓冲器存储数据,能大大降低主机处理器负荷及系统功耗。

加速度计的标定通常是在重力场下采用基于重力的多位置翻滚标定法,常用的有 6 位置^[5]、10 位置^[10]、12 位置^[11]及 24 位置^[12]标定等,根据确定位置的理论加速度和传感器的量测值来解算传感器标定系数矩阵中的未知量。为了简化现场标定的难度,文中采用基于长方体的六位置标定法并按表 1 所示设置传感器各敏感轴位置方向。将 ADXL345 设置成全分辨率模式时,其灵敏度为 256LSB/g(或 0.003 9 g/LSB)。当敏感轴与重力方向平行时其理论值应输出 256LSB 或 -256LSB。

表 1 加速度计各轴取向与加速度输出

Tab. 1 Sensitive axis orientation and acceleration values of accelerometer

位置	敏感轴取向			加速度值(LSB)		
	x 轴	y 轴	z 轴	x 轴	y 轴	z 轴
1	上	前	左	256	0	0
2	下	前	右	-256	0	0
3	左	上	前	0	256	0
4	右	下	前	0	-256	0
5	前	左	上	0	0	256
6	前	右	下	0	0	-256

2.1 加速度计六位置现场简单标定法

加速度计零位偏差校准需要在静态下进行,将传感器模块安放在一长方体盒状物的某个面上,并使传感器的三个敏感轴方向与长方体的长宽高平行。将盒状物按位置 1 放置在经过气泡水平仪检验后的相对水平的一个桌面上,保持静止状态至 2~3 min,记录经过均值滤波的 x 轴输出,记为 X_{+1g} ;然后按位置 2 放置得到 X_{-1g} ,则 x 轴的零位偏差 B_x 由式(3)计算出来,同理可得 y 轴 z 轴的零位偏差 B_y, B_z 。

$$B_x = (X_{+1g} + X_{-1g})/2 \quad (3)$$

x 轴的比例因子 S_x 可由式(4)计算得到,同理可以得到 y 轴、z 轴的标度因数 S_y, S_z 。

$$S_x = 256 \times 2 / (X_{+1g} - X_{-1g}) \quad (4)$$

通过 6 个位置测试得到加速度计各敏感轴的零偏与比例因子(表 2),为降低单片机处理负荷数据做了取整处理,其中 M 为加速度计敏感轴实际输出,并记该标定过程为现场标定 I。

表 2 现场简易标定 I 加速度计零偏与比例因子

Tab. 2 Bias and scale factor of accelerometer in simple field calibration I

敏感轴	LSB			比例因子
	M_{+1g}	M_{-1g}	零偏	
x 轴	278	-246	-16	0.977 099 24
y 轴	265	-257	-4	0.980 842 91
z 轴	262	-246	-8	1.007 874 02

2.2 加速度计三轴转台标定法

为了检验现场标定的精度,将传感器模块安放在北京航空精密机械研究所研制的 SGT320E 型三轴多功能转台的内框上,MCU 采用 Atmega16,串口波特率设置为 110592,设置转台工作于“位置方式”,转台的“位率”采用默认值 10.000($^{\circ}$)/s,“位加速度”采用默认值 10.000($^{\circ}$)/s²。



(a) 模式设置 (b) 三轴转台
(a) Mode settings of turntable (b) 3-Axis turntable

图 1 转台模式设置与转台标定实验

Fig. 1 Mode settings and calibration experiments of turntable

在 6 种位置下分别采集 xyz 3 个敏感轴的原始数据至少 20 组取平均值,且小数点后保留 2 位有效数字,得到 6 位置下的原始数据如表 3 所示。

为便于求解传感器数学模型中的 12 个未知参数,对传感器模型 2 进行等价变换

$$[D_x \ D_y \ D_z] = [M_x \ M_y \ M_z \ 1] \cdot \begin{bmatrix} S_x & k_{yx} & k_{zx} \\ k_{xy} & S_y & k_{zy} \\ k_{xz} & k_{yz} & S_z \\ B_x & B_y & B_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

记为： $\mathbf{D}=\mathbf{M} \cdot \mathbf{K}$ 。其中： \mathbf{D} 为已知的6个位置的重力加速度； \mathbf{M} 为加速度传感器的6个位置原始输出； \mathbf{K} 为待求标定系数矩阵，共12个未知参数。

表3 实验室转台标定加速度计6位置输出

Tab. 3 Six position output of accelerometer in laboratory calibration with turntable

位置	加速度计输出(LSB)		
	x 轴	y 轴	z 轴
1	277.58	3.97	8.79
2	-246.48	4.09	6.60
3	15.16	265.36	8.35
4	15.40	-256.82	5.30
5	14.19	1.29	262.17
6	15.99	6.75	-245.99

在位置1下有

$$\mathbf{D}_{(1)}=[256 \ 0 \ 0] \quad (6)$$

$$\mathbf{M}_{(1)}=[277.58 \ 3.97 \ 8.79 \ 1] \quad (7)$$

同理，由表1加速度计理论输出值及表3的实际测量值可以得到 $\mathbf{D}_{(2)}$ 、 $\mathbf{D}_{(3)}$ 、 \dots 、 $\mathbf{D}_{(6)}$ 和 $\mathbf{M}_{(2)}$ 、 $\mathbf{M}_{(3)}$ 、 \dots 、 $\mathbf{M}_{(6)}$ 。表示成矩阵形式 $\mathbf{D}_{6 \times 3}=[\mathbf{D}_{(1)}, \mathbf{D}_{(2)}, \mathbf{D}_{(3)}, \mathbf{D}_{(4)}, \mathbf{D}_{(5)}, \mathbf{D}_{(6)}]^T$ ， $\mathbf{M}_{6 \times 4}=[\mathbf{M}_{(1)}, \mathbf{M}_{(2)}, \mathbf{M}_{(3)}, \mathbf{M}_{(4)}, \mathbf{M}_{(5)}, \mathbf{M}_{(6)}]^T$ 。

则式(5)可表示为： $\mathbf{D}_{6 \times 3}=\mathbf{M}_{6 \times 4} \cdot \mathbf{K}_{4 \times 3}$ ，可得到18个方程，需求解12个未知数，因此采用最小二乘法即可得到最优解。鉴于篇幅，此处推导从略，给出系数矩阵解的表达式如下

$$\mathbf{K}_{4 \times 3}=[\mathbf{M}_{6 \times 4}^T \cdot \mathbf{M}_{6 \times 4}]^{-1} \cdot \mathbf{M}_{6 \times 4}^T \cdot \mathbf{D}_{6 \times 3} \quad (8)$$

在MATLAB中求出标定系数矩阵为

$$\mathbf{K}_{4 \times 3}=\begin{bmatrix} 0.976 \ 971 \ 47 & 0.000 \ 180 \ 55 & -0.004 \ 210 \ 58 \\ 0.000 \ 428 \ 86 & 0.980 \ 442 \ 82 & -0.005 \ 883 \ 96 \\ 0.003 \ 466 \ 13 & 0.010 \ 537 \ 70 & 1.007 \ 465 \ 43 \\ -14.982 \ 060 \ 87 & -4.108 \ 534 \ 48 & -7.504 \ 317 \ 74 \end{bmatrix} \quad (9)$$

则标定补偿后的加速度传感器输出值可由下面标定补偿解算矩阵得到

$$\begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.976 \ 971 \ 47 & 0.000 \ 428 \ 86 & 0.003 \ 466 \ 13 \\ 0.000 \ 180 \ 55 & 0.980 \ 442 \ 82 & 0.010 \ 537 \ 70 \\ -0.004 \ 210 \ 58 & -0.005 \ 883 \ 96 & 1.007 \ 465 \ 43 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -14.982 \ 060 \ 87 \\ -4.108 \ 534 \ 48 \\ -7.504 \ 317 \ 74 \end{bmatrix} \quad (10)$$

将转台标定得到的比例因子 $S_i(i=x, y, z)$ 和零偏值 $B_i(i=x, y, z)$ 与表2中的数据对比见表4，不难发现现场简易标定I与转台精确标定得到的加速度计比例因子和零偏值已经非常接近，其中比例因子偏差在 $\pm 10^{-3}$ 左右， x 轴的零偏移值偏差最大为1.018LSB，约为0.003 97 g， y 轴、 z 轴的零偏移值偏差均小于0.5LSB。

表4 转台标定与两种现场标定结果对比

Tab. 4 Turntable calibration results compared with two kinds of field calibration

标定系数	现场标定 I	转台标定	现场标定 II
S_x	0.977 099 24	0.976 971 74	0.976 987 47
S_y	0.980 842 91	0.980 442 82	0.980 504 81
S_z	1.007 874 02	1.007 465 43	1.007 556 68
B_x	-16	-14.982 060 87	-15.55
B_y	-4	-4.108 534 48	-4.27
B_z	-8	-7.504 317 74	-8.09

现场简易标定I是为了便于单片机快速处理，因此表2中数据是按四舍五入做了取整处理。如果小数点后保留2位有效数据进行简单标定(记为简易现场标定II)，以表3的数据为例计算得到的3个轴的比例因子与转台标定后的比例因子更接近(见表4)，比例因子偏差能再降低一个数量级，在 $\pm 10^{-4}$ 左右。 x 轴零偏移值误差也降低至0.568LSB，即0.002 22 g， y 轴、 z 轴的零偏移值偏差虽略有增加，但均小于0.1LSB。

3 两种标定方法精度验证

由于实验室现有条件限制，不能对加速度计标定精度进行直接验证，故在重力场空间采用间接验证的方法。其原理如下，当加速度计模块倾斜放置时，由重力加速度在其3个正交敏感轴上的分量 $M_i(i=x, y, z)$ 可以计算出其各敏感轴相对水平面的夹角，定义俯仰角 ρ 为敏感轴 x 与水平面夹角，定义翻滚角 γ 为敏感轴 y 与水平面的夹角，则有

$$\begin{pmatrix} \rho \\ \gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \arctan\left(\frac{M_x}{\sqrt{M_y^2 + M_z^2}}\right)/\pi \times 180^\circ \\ \arctan\left(\frac{M_y}{\sqrt{M_x^2 + M_z^2}}\right)/\pi \times 180^\circ \end{pmatrix} \quad (11)$$

将加速度计模块放置在三轴转台内框上，转动转台内框使加速度计翻滚角置于 30.000° 并保持不变，然后按表5所示的俯仰角转动转台中框。由加速度计原始数据和经过两种标定方法补偿后的数据

解算俯仰角,结果如表 5 所示。

表 5 加速度计标定前后及角度误差

Tab. 5 Output of accelerometer and angular errors before and after calibration

俯仰角/ (°)	无标定	误差	现场 标定 I	误差	转台 标定	误差
-45.000	-42.129	-2.871	-45.394	0.394	-45.367	0.367
-30.000	-26.632	-3.368	-30.097	0.097	-30.080	0.080
-20.000	-16.409	-3.591	-19.949	-0.051	-19.952	-0.048
-10.000	-6.496	-3.504	-10.031	0.031	-10.063	0.063
0.000	3.099	3.099	-0.365	-0.365	-0.429	-0.429
10.000	13.067	3.067	9.801	-0.199	9.699	-0.301
20.000	22.799	2.799	19.830	-0.170	19.689	-0.311
30.000	32.232	2.232	29.679	-0.321	29.502	-0.498

由表 5 可知,标定补偿前的角度偏差最大值为 3.591°,简易现场标定 I 后的绝对误差降为 0.051°,转台标定补偿后的角度误差降为 0.048°。可以看出,未经校准补偿的输出误差较大,无论是简单标定法还是转台标定均能将输出绝对误差减小约 2 个数量级左右。同时可以看出,简易现场标定 I 法与转台标定法的精度大致相当,甚至在某些位置,现场简单标定补偿后的准确度更高,这也证明了忽略安装误差的简单现场标定法简单可行、正确有效。

在加速度传感器标定中,一般认为标定点的位位置选取越多,标定结果越正确,然而事实并非总是如此。笔者在 6 位置的基础上,分别增加 4 个和 8 个位置,即设置三轴转台使加速度传感器模块的敏感轴 z 轴向上、向下并分别置俯仰角和翻滚角为 +45°, -45°,记录传感器均值输出。根据最小二乘原理解算加速度计在 10 位置下和 14 位置下的标定系数矩阵,按上述方法间接检验标定结果,得到角度解算误差曲线如图 2 所示。从图示各偏差曲线可以看出,对加速度计进行更多位置的标定,操作繁琐,

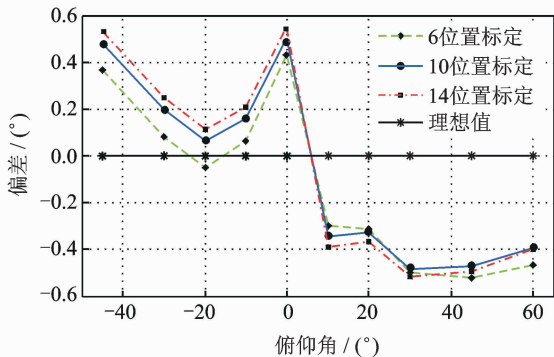


图 2 多位置标定俯仰角偏差比较

Fig. 2 Comparison of pitch error with multi-position calibration

数据处理与解算复杂程度加剧,然而标定精度并没得到预期提高。

4 结束语

在使用 MEMS 惯性传感器对物体进行姿态解算前,必须对其进行标定和误差补偿。笔者详细地介绍了两种标定 MEMS 数字加速度计方法,即现场标定法和转台标定法,给出了标定系数的解算过程及验证原理。转台多位置标定试验表明,更多位置标定法对传感器输出精度的提高能力有限,并不一定能带来预期效果,且标定过程繁琐、数据处理以及系数解算复杂。基于普通气泡水平仪和一个具有长方体结构的盒状物的六位置现场标定法,具有便捷快速、简单易行和准确有效的优点,特别适合于现场标定。同时,文中的标定过程及系数矩阵解算方法具有一定的通用性,可为 MEMS 三轴数字加速度计的标定补偿校准提供参考。

参 考 文 献

[1] 张智刚,罗锡文. 农业机械导航中的航向角度估计算法[J]. 农业工程学报,2008,24(5):110-114.
Zhang Zhigang, Luo Xiwen. Adaptive weighted fusion algorithm for orientation evaluation of agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008,24(5):110-114. (in Chinese)

[2] 薛亮,李天志,李晓莹,等. 基于 MEMS 传感器的微型姿态确定系统研究[J]. 传感技术学报,2008,21(3):457-460.
Xue Liang, Li Tianzhi, Li Xiaoying, et al. Study of micro attitude determination system based on MEMS sensors[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2008,21(3):457-460. (in Chinese)

[3] 张丽杰,常佶. 小型飞行器 MEMS 姿态测量系统[J]. 振动、测试与诊断,2010,30(6):698-714.
Zhang Lijie, Chang Ji. MEMS-based attitude measurement system for miniature air vehicle[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010,30(6):698-714. (in Chinese)

[4] 宋丽君,秦永元. MEMS 加速度计的六位置测试法[J]. 测控技术,2009,28(7):11-17.
Song Lijun, Qin Yongyuan. Six-position testing of MEMS Accelerometer[J]. Measurement & Control Technology,2009,28(7):11-17. (in Chinese)

- [5] 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): 1-11.
- [6] 赵玉龙, 刘岩, 孙禄. 机械故障信息监测 MEMS 高频加速度传感器[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(6): 875-882.
Zhao Yulong, Liu Yan, Sun Lu. MEMS high-frequency accelerometers for mechanical fault monitoring[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(6): 875-882. (in Chinese)
- [7] 李杰, 洪惠惠, 张文栋. MEMS 微惯性测量组合标定技术研究[J]. 传感器技术学报, 2008, 21(7): 1170-1173.
Li Jie, Hong Huihui, Zhang Wendong. Research on calibration techniques for MEMS-micro inertial measurement unit[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2008, 21(7): 1170-1173. (in Chinese)
- [8] Hung Y, Lee S. A calibration method for six-accelerometer INS[J]. International Journal of Control Automation and Systems, 2006, 4(5): 615-623.
- [9] Syed Z F, Aggarwal P, Goodall C, et al. A new multi-position calibration method for MEMS inertial navigation system[J]. Measurement Science and Technology, 2007, 18(7): 1897-1907.
- [10] 孙枫, 曹通. 基于 Kalman 滤波的加速度计十位置标定方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(10): 2272-2276.

Sun Feng, Cao Tong. Ten-position calibration for accelerometer based on Kalman filter[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(10): 2272-2276. (in Chinese)

- [11] 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. (in Chinese)
- [12] 肖桂平, 武元新, 吕鸣, 等. 加速度计的多位置标定精度分析与比较[J]. 战术导弹控制技术, 2008, 30(2): 23-32.
Xiao Guiping, Wu Yuanxin, Lü Ming, et al. Analysis and comparison of multi-position calibrations[J]. Control Technology of Tactical Missile, 2008, 30(2): 23-32. (in Chinese)



第一作者简介: 彭孝东, 男, 1980 年 8 月生, 博士研究生、讲师。主要研究方向为农业机械的组合导航与定位、图像处理与机器视觉等。曾发表《MEMS 三轴数字陀螺仪标定方法研究》(《传感器与微系统》2013 年第 32 卷第 6 期) 等论文。
E-mail: pxd2005@scau.edu.cn

通信作者简介: 张铁民, 男, 1961 年 11 月生, 教授、博士生导师。主要研究方向为农业电气化与自动化。
E-mail: tm-zhang@163.com

《振动、测试与诊断》被《中国学术期刊文摘》收录

《中国学术期刊文摘》(简称 CSA) 通过对全国近 5 000 种科技期刊的学术指标统计和专家评审综合评估, 确定了 500 余种优秀科技期刊为收录源期刊, 内容涉及自然科学、医药科学、农业科学、工程与技术科学等学科。本刊将于 2014—2015 年度被收录其中。

