

基于神经网络的 MEMS 陀螺标定与补偿

程 章,许江宁,许 微,梁佩雷

(海军工程大学 导航工程系,湖北 武汉 430033)

摘 要:针对微机电系统(MEMS)陀螺低转速区间上非线性性能很强,采用传统方法对其标定误差较大,满足不了实际应用的问题,因此,采用了一种基于误差反向传播(BP)的神经网络的标定与补偿方法。设计了一组基于优先数的速率点,利用三轴转台进行 12 组速率实验,用最小二乘法求出在传统数学模型下的待标定系数;将三轴 MEMS 陀螺的输出和转台的实际转速作为样本,对 BP 神经网络进行训练,得到神经网络的补偿模型,并对比两种方法的补偿效果。结果表明,传统方法和 BP 神经网络都对 MEMS 陀螺的输出进行了有效的补偿;但在低转速区间上,神经网络的补偿效果比传统方法提高了 3 倍左右。

关键词:神经网络;微机电系统(MEMS)陀螺;标定与补偿;速率实验;非线性

中图分类号:V241

文献标识码:A

DOI:10.11977/j.issn.1004-2474.2018.01.026

Calibration and Compensation of MEMS Gyroscope With Neural Network

CHENG Zhang, XU Jiangning, XU Wei, LIANG Peilei

(Dept. of Navigation, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Aiming at the problem that the non-linearity of MEMS gyroscope at low speed range is very strong, the conventional error calibration method cannot meet the practical application, a calibration and compensation method based on the back propagation (BP) neural network is proposed in this paper. A set of rate points based on the number of priority is designed and 12 groups of rate experiments are carried out with the three-axis turntable. The least square method is used to calculate the elements of the traditional mathematical model for calibration. We use the outputs of three MEMS gyroscopes and the actual rate of the three-axis turntable as the sample to train the BP neural network to build the model. Also, we compare the compensation effect of two methods. The results show that both the traditional method and the BP neural network can compensate the output of the MEMS gyroscope effectively. However, the compensation effect of the neural network is about 3 times higher than that of the traditional method at the low speed range.

Key words: neural network; MEMS gyroscope; calibration and compensation; rate experiment; nonlinearity

0 引言

传统的惯性器件精度高,但是质量大,成本高及耗能大^[1],主要应用于军事和航海航空方向^[2]。随着微机电系统(MEMS)技术的发展,惯性器件的成本不断下降,体积、质量和功耗也不断下降。目前, MEMS 惯性器件的精度已达到了战术级的使用要求,且还在不断提高。提高 MEMS 陀螺精度的方式主要有两种:

- 1) 改进生产工艺,提高材料性能,从而提高测量精度。
- 2) 通过建模与补偿,利用算法提高器件的测量

精度。对于工程技术人员而言,第 2) 种方法由于见效快,是研究的一大热点。

由于低精度的 MEMS 陀螺采用批量生产的方式,所以对其进行标定是必要的。但是由于 MEMS 陀螺的精度很低,特别是在低转速区间上非线性很强,采用传统方法对其标定误差较大,满足不了实际应用的需求。因此,本文采用基于神经网络的补偿方法。神经网络是处理非线性优化问题的一个很好的工具,其中基于误差反向传播(BP)^[3-4]的网络强大的非线性映射能力,使任意连续的非线性函数和映射均可采用 3 层网络建模加以实现。

收稿日期:2017-05-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41574069;41404002;61503404);国家重大科学仪器开发专项基金资助项目(2011YQ12004502)

作者简介:程章(1992-),男,江苏泰州人,硕士生,主要从事惯性技术及其应用的研究。通信作者:许江宁(1964-),男,教授,博士生导师,主要从事惯性技术及其应用的研究。

1 MEMS 陀螺误差模型

1.1 传统 MEMS 陀螺模型

MEMS 陀螺的误差^[5-6]主要包括刻度因数、安装误差和零偏。由于 MEMS 陀螺输出的角速率精度低,因此,将实际角速率作为输入, MEMS 陀螺输出的角速率为输出,由此建立陀螺的误差模型。

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{gx0} \\ \omega_{gy0} \\ \omega_{gz0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{gx} & K_{gxy} & K_{gxz} \\ K_{gyx} & K_{gy} & K_{gyz} \\ K_{gzx} & K_{gzy} & K_{gz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{bx} \\ \omega_{by} \\ \omega_{bz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $[\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$ 为陀螺的采样输出; $[\omega_{gx0} \ \omega_{gy0} \ \omega_{gz0}]^T$ 为陀螺零偏; $[\omega_{bx} \ \omega_{by} \ \omega_{bz}]^T$ 为陀螺

的角速率; $\begin{bmatrix} K_{gx} & K_{gxy} & K_{gxz} \\ K_{gyx} & K_{gy} & K_{gyz} \\ K_{gzx} & K_{gzy} & K_{gz} \end{bmatrix}$ 为陀螺的标度系数

矩阵。标定的目的是计算其中的系数,提高陀螺精度,并由此可得陀螺的补偿模型为

$$\omega_b = K_g^{-1}(\omega - \omega_{g0}) \quad (2)$$

1.2 BP 神经网络模型

在实际标定过程中发现,在低转速区间上,陀螺的非线性很强,导致有的低速状态无法识别,分辨率很低。引起 MEMS 陀螺非线性的因素有很多,如果采用多项式拟合法,很难准确描述这种特性,同时计算量也很大。BP 神经网络具有处理非线性问题的能力,且处理方式简单高效。

神经网络通常分为输入层、隐含层和输出层 3 层,如图 1 所示。BP 神经网络通常有正向传播和反向传播两个部分。正向传播的过程,每一层神经元只影响下一层神经元的结构,通过激活函数得到输出值。当输出值与理想输出值偏差较大或不满足误差要求时,就要将误差信号转入反向传播过程对神经网络的权值进行校正,修正权值使网络输出值与理想输出值的误差达到设定的水平。首先通过训练可以很方便地拟合并建立 MEMS 陀螺的误差模型,再利用该网络对实际输出进行补偿。

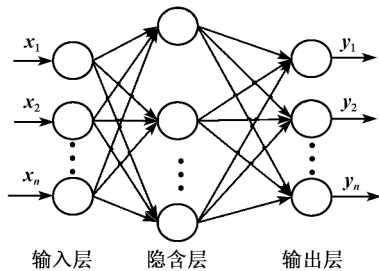


图 1 神经网络原理图

2 实验

2.1 实验方法

实验所用器件如图 2 所示,该器件包含了 MPU6050 惯性测量单元,具有三轴陀螺仪。测试方法是利用高精度的三轴转台,进行速率实验,速率转台如图 3 所示。



图 2 MEMS 器件实物图



图 3 高精度三轴转台

将该模块通过夹具固定在转台上,三轴指向与转台的内框、中框和外框的轴向相平行。考虑转台的实际转速能力和 MEMS 陀螺的量程区间,最大转速设置为 $\pm 75 (^{\circ})/\text{s}$,转台速率值的选取按照 GB-321 规定的 R5 系列选取^[7],分别为 $0, \pm 1.0 (^{\circ})/\text{s}, \pm 1.6 (^{\circ})/\text{s}, \pm 2.5 (^{\circ})/\text{s}, \pm 4.0 (^{\circ})/\text{s}, \pm 6.3 (^{\circ})/\text{s}, \pm 10.0 (^{\circ})/\text{s}, \pm 16.0 (^{\circ})/\text{s}, \pm 25.0 (^{\circ})/\text{s}, \pm 40.0 (^{\circ})/\text{s}, \pm 63.0 (^{\circ})/\text{s}, \pm 75.0 (^{\circ})/\text{s}$,共 12 组速率值。

速率标定步骤^[8]如下:

1) 接通 MEMS 陀螺的电源,设定陀螺的采样频率为 100 Hz,预热 5 min,使陀螺工作在稳定的状态。

2) 选取第一组速率点,转台绕外框正转,采集 2 min 的 x, y, z 轴的 MEMS 陀螺仪的输出值,采集完成后转台停转;转台反转,采集 2 min 的 x, y, z 轴的 MEMS 陀螺仪的输出值,采集完成后转台停转。

3) 按照步骤 2) 依次采集 12 组速率点的数据。

4) 分别绕中框和内框按照相同的方法标定其他两个轴的参数。

2.2 数据处理

对每组采集到的数据求平均值,以减小随机误

差对结果的影响。 x 轴平均后的数据如表 1 所示, y 、 z 轴的数据限于篇幅不再列出。

表 1 外框各速率点下输出平均值

转速/ [$(^{\circ}) \cdot s^{-1}$]	-75	-63	-40	-25	-16	-10
x	-87.74	-73.74	-46.86	-29.33	-18.68	-11.53
y	0.29	0.30	0.24	0.22	-0.03	-0.13
z	0.08	0.09	0.09	0.09	0.03	0.03
转速/ [$(^{\circ}) \cdot s^{-1}$]	-6.3	-4.0	-2.5	-1.6	-1.0	0
x	-7.54	-4.68	-2.93	-0.02	-0.009	0.03
y	0.18	0.01	-0.01	0.02	0.008	-0.005
z	-0.08	-0.01	-0.01	0.01	0	0.03
转速/ [$(^{\circ}) \cdot s^{-1}$]	1.0	1.6	2.5	4.0	6.3	10
x	-0.01	3.78	2.91	4.67	7.36	11.18
y	-0.000 1	0.08	-0.01	-0.004	-0.003	-0.10
z	-0.03	0.02	-0.001	-0.03	-0.02	0.02
转速/ [$(^{\circ}) \cdot s^{-1}$]	16	25	40	63	75	
x	18.45	29.07	46.60	73.48	87.51	
y	-0.01	0.15	0.14	0.09	0.09	
z	-0.12	0.10	0.11	0.11	0.10	

采用两种方法完成对 MEMS 陀螺仪的标定。对于传统的 MEMS 陀螺模型,采用最小二乘法^[9-10]完成参数的确定,经计算得到标度系数矩阵为

$$\begin{bmatrix} 1.180\ 4 & 0.003\ 3 & -0.036\ 4 \\ -0.001\ 4 & 1.115\ 2 & -0.002\ 9 \\ 0.000\ 1 & 0.000\ 9 & 1.107\ 5 \end{bmatrix}。$$

因为 MEMS 陀螺存在一定的安装误差,当旋转一个框时,实际上另外两个方向上的陀螺也会有输出。所以,MEMS 陀螺的三轴实际输出的角速度作为神经网络的输入。隐含层含有 5 个神经元,输出即为三轴的真实角速度。通过转台提供的真实角速度对网络进行训练,训练的回归图和性能图分别如图 4、5 所示。

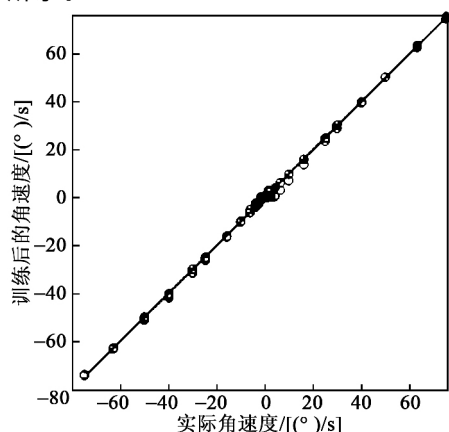


图 4 网络训练回归图

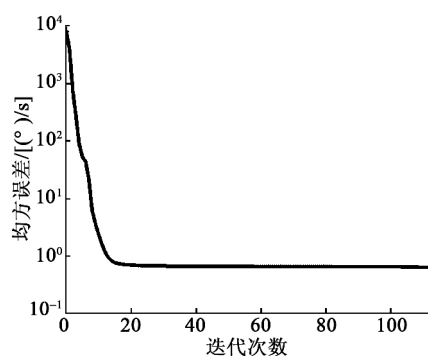


图 5 网络训练性能图

由图 4 可知,经过训练后的网络,实际输出和网络输出拟合的较好;由图 5 可知,随着迭代次数的增加,网络的均方误差逐渐减小并趋于收敛。因此,经过训练后的神经网络可以应用在该 MEMS 陀螺输出的补偿上。

3 验证实验及结论

为了验证神经网络对 MEMS 陀螺补偿的有效性,同时对比传统标定补偿方法,验证 BP 神经网络对 MEMS 补偿的优越性,利用三轴转台,在低转速和高转速下,对外框旋转,并进行 6 组验证性的速率实验,每组数据采集 30 s,平均后的值是陀螺的原始输出,验证的速率点为 $-1.0 (^{\circ})/s$ 、 $2.0 (^{\circ})/s$ 、 $-3.0 (^{\circ})/s$ 、 $30 (^{\circ})/s$ 、 $-50 (^{\circ})/s$ 和 $70 (^{\circ})/s$ 。在相应的速率点下陀螺的直接输出值如表 2 所示。

表 2 MEMS 陀螺原始输出

组别	1	2	3	4	5	6
x	-0.01	2.51	-3.97	34.92	-58.53	-81.74
y	0.02	-0.01	-0.04	0.16	0.28	0.29
z	0.07	-0.01	-0.03	0.11	0.09	0.09

由表 2 可知,如果不对该 MEMS 器件的 3 轴陀螺进行补偿,则该器件的输出误差较大。表 3 为传统方法补偿和神经网络补偿后的 x 轴向上 MEMS 陀螺的输出。

表 3 补偿后的输出

组别	1	2	3	4	5	6
传统方法	0.01	1.27	-2.61	29.60	-49.56	69.13
神经网络	0.04	2.20	-3.15	30.36	-49.37	70.72

误差为补偿后的数据与真实转速差值的绝对值。经过计算,得到 MEMS 陀螺补偿后的误差如表 4 所示。

表 4 补偿后的误差

组别	1	2	3	4	5	6
传统方法	1.01	0.73	0.39	0.40	0.44	0.87
神经网络	1.04	0.20	0.15	0.36	0.63	0.72

由表 1~3 的数据可得出如下结论:

1) 该 MEMS 陀螺无法感知 $1(^{\circ})/s$ 及以下的转速。由表 2 的原始输出可看出,在 $1(^{\circ})/s$ 的转速下,输出几乎为 0,所以无论是传统方法还是通过神经网络,都无法对 $1(^{\circ})/s$ 以下的转速进行有效的补偿。

2) 在可以感知的低转速下,神经网络的补偿效果明显优于传统模型。由表 4 的第 2、3 组的误差可看出,神经网络的补偿效果比传统方法的补偿效果提高了 3 倍左右。最后,在高转速下,传统方法与神经网络的补偿效果相当,这由 4、5、6 组的补偿效果可知。

4 结束语

本文分别利用传统方法和 BP 神经网络完成了对 3 轴 MEMS 陀螺进行标定与补偿,合理的设计了 3 轴转台的速率点。实验结果表明,传统方法和 BP 神经网络都对 MEMS 陀螺的输出进行了有效的补偿,在低转速区间上,神经网络的补偿效果比传统方法提高了 3 倍左右。

参考文献:

- [1] 秦永元. 惯性导航[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2014: 243-332.
- [2] 陈永冰, 钟斌. 惯性导航[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017: 137-173.
- [3] 郭士萃, 许江宁, 李峰, 等. 优化 BP 神经网络的光纤陀螺温度漂移建模与补偿[J]. 中国惯性技术学报, 2016, 24(1): 93-97.
GUO Shiluo, XU Jiangning, LI Feng, et al. Modeling and compensation algorithm of FOG temperature drift with optimized BP neural network[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2016, 24(1): 93-97.
- [4] 彭基伟, 吕文华, 行鸿彦, 等. 基于改进 GA-BP 神经网络的湿度传感器的温度补偿[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(1): 153-160.
PENG Jiwei, LV Wenhua, XING Hongyan, et al. Temperature compensation for humidity sensor based on improved GA-BP neural network[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(1): 153-160.
- [5] 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 Ting, SUN Wei, WEN Jian. Error analysis and calibration of MEMS inertial components [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2016, 29(6): 859-864.
- [6] 龚大伟, 刘宇, 钟懿, 等. MEMS 陀螺混合误差标定方法研究[J]. 压电与声光, 2016, 38(2): 298-303.
GONG Dawei, LIU Yu, ZHONG Yi, et al. Research on the mixing error calibration method of MEMS gyro [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2016, 38(2): 298-303.
- [7] 侯子怡, 虞翔, 卢丽勇, 等. 光纤陀螺仪测试方法: CN102128637A[P]. 2011.
- [8] 宋丽君, 秦永元. MEMS 陀螺仪的一种实用标定法[J]. 压电与声光, 2016, 38(2): 298-303.
SONG Lijun, QIN Yongyuan. A practical calibration method on MEMS gyroscope [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2016, 38(2): 298-303.
- [9] BRASCA L M C, BERNARDI P, REORDA M S, et al. A parallel tester architecture for accelerometer and gyroscope MEMS calibration and test[J]. Journal of Electronic Testing, 2011, 27(3): 389-402.
- [10] 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.

《压电与声光》免费索阅卡

姓名: _____ 职务: _____ 职称: _____ 单位: _____
地址: _____ 邮编: _____ 电话: _____
企业产品: _____

索阅期号: _____ 年 _____ 月 (每次仅限壹期)

复印有效