

高成本和低成本 MEMS 加速度计性能比较研究

杜少林, 陈鹏光, 陈书钊, 曾春华, 陈剑鸣

(昆明理工大学 理学院, 云南 昆明 650500)

摘 要: 受微加工技术的限制, 微机电系统(MEMS) 加速度计在精度和可靠性方面存在劣势, 针对这一问题, 基于 Allan 方差分析法, 对高成本和低成本的两种 MEMS 加速度计进行了实测和分析, 得到了 5 项噪声系数, 对两种传感器的性能进行了评估和对比, 验证了 Allan 方差方法应用于加速度计误差辨识的可行性, 并为加速度计的使用和研究提供了依据。

关键词: MEMS 加速度计; 噪声系数; 性能对比; Allan 方差

中图分类号: TH89

文献标识码: A

文章编号: 1000-9787(2018) 04-0048-03

Research on performance comparison of high cost and low cost MEMS accelerometers

DU Shao-lin, CHEN Peng-guang, CHEN Shu-zhao, ZENG Chun-hua, CHEN Jian-ming
(Faculty of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Because of the limitations of micro-machining technology, micro-electro-mechanical system (MEMS) accelerometer has disadvantage in precision and reliability, aiming at this problem, high cost and low cost MEMS accelerometers are measured and analyzed based on Allan variance analysis method, five noise coefficients are obtained, performance of two kinds of sensors are evaluated and compared. The feasibility of applying Allan variance method to error identification of accelerometer is verified, and provide basis for application and research of accelerometer.

Keywords: MEMS accelerometer; noise coefficient; performance comparison; Allan variance

0 引 言

由于微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS) 工艺技术的限制, MEMS 加速度计的精度存在缺陷, 不同种类的 MEMS 加速度计之间存在区别^[1-3]。因此, 研究三轴加速度计的误差辨识方法, 对传感器误差估计, 对 MEMS 加速度计性能对比, 具有十分重要的意义^[2]。

目前, 经常使用的惯性传感器性能评估方法包括自回归滑动平均(auto-regressive moving average, ARMA) 模型、功率谱密度(power spectral density, PSD) 、Allan 方差估计等方法^[4-6]。Allan 方差法^[4] 计算简单, 易于理解, 且随机噪声在曲线各斜率段具有明确的意义, 也能有效估计和确定公式模型中的随机噪声系数^[5-7]。因此, Allan 方差被广泛应用于 MEMS 惯性传感器的噪声分析和性能评估。

本文针对 InvenSense 公司 MPU6050 和 Beetech 公司 A302EX 设计了数据采集系统, 对 2 种传感器进行实测和分析, 应用 Allan 方差方法对 2 种加速度计误差系数进行计算和评估及性能对比。本文的研究方法和实验数据为

MEMS 加速度计的噪声问题研究和客户使用提供了参考, 并对其他 MEMS 惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU) 具有指导意义。

1 MEMS 加速度计误差源

MEMS 加速度计误差源主要有: 加速度固有噪声和加速度对准误差。

加速度固有噪声指加速度计在静态惯性环境条件下运行时其输出中的随机振动^[1]。主要包括以下几项: 1) 零点漂移^[8]; 2) 电学噪声^[9]; 3) 温度效应^[10]; 4) 热机械噪声^[11]。这些误差对于 MEMS 加速度计用户很难控制, 因此, 可用 MEMS 加速度计噪声大小来评估 MEMS 加速度计性能。

对准误差是加速度计三个轴分量相对于系统定义的惯性参考系之间的角度差^[2]。理想情况下, 加速度计的各个旋转轴将与系统参考系中的轴完全对中, 但实际使用中每个加速度的对中误差均具有 2 个分量。

收稿日期: 2017-01-12

2 Allan 方差分析法

以采样间隔 T_s 对传感器的数据进行采样,共采样 N 个点,将 N 个数据分为 K 组,每组包含 n 个采样点, $K=N/n,n\leqslant(N-1)/2$,每组相关时间为

$$\tau=nT_s \tag{1}$$

求 $k+1$ 个子集的平均值

$$\overline{\Omega}_{k+1}(n)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n\Omega_{nk+i} \tag{2}$$

式中 Ω_{nk+i} 为第 $k+1$ 个子集中的第 i 个采集点。

Allan 方差的计算公式为

$$\begin{aligned}\sigma^2(\tau)&=\frac{1}{2}E\left[\left(\overline{\Omega}_{k+1}(\tau)-\overline{\Omega}_k(\tau)\right)^2\right] \\&=\frac{1}{2(k-1)}\sum_{k=1}^{k-1}\left(\overline{\Omega}_{k+1}(\tau)-\overline{\Omega}_k(\tau)\right)^2\end{aligned} \tag{3}$$

式中 k 为划分的子集个数; E 为求平均计算。实际应用中,Allan 方差的计算基于一组有限的数据,会导致 Allan 方差估计有误差,文献 [4] 给出了误差区间的计算公式

$$\sigma(\delta_{AV})=\frac{1}{\sqrt{2(N/n-1)}} \tag{4}$$

式中 N 为总数据点数; n 为每个子集包含的数据点数。在频域上,Allan 方差与平稳随机过程的功率谱密度 $S_{\omega}(f)$ 存在如下关系 [6]

$$\sigma^2(\tau)=4\int_0^{\infty}S_{\omega}(f)\frac{\sin^4(\pi f\tau)}{(\pi f\tau)^2}df \tag{5}$$

式(5)说明:当通过一个传递函数为 $\sin^4(\pi f\tau)/(\pi f\tau)^2$ 的滤波器时,Allan 方差与传感器输出的总误差功率成正比。表 1 给出了 Allan 方差与加速度计噪声的对应关系。

表 1 Alan 方差与 MEMS 加速度计噪声关系

噪声类型	参数	Allan 标准差
量化噪声/(m/s)	Q	$\sigma_Q=\sqrt{3}Q/\tau$
速度随机游走/(m/s/ \sqrt{h})	N	$\sigma_N=N/\sqrt{\tau}$
零偏不稳定性/(m/s ²)	B	$\sigma_B=B/0.6648$
加速度随机游走/(m/s/h ^{1.5})	K	$\sigma_K=K\sqrt{\tau/3}$
速率斜坡/(m/s/h ²)	R	$\sigma_R=R\tau/\sqrt{2}$

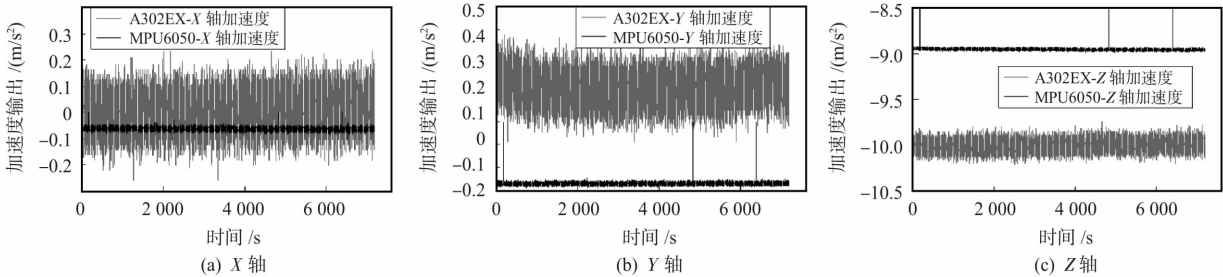


图 1 MPU6050 和 A302EX 三轴加速度原始数据对比曲线

由于各噪声的相关时间不同,各噪声源是统计独立的,可以用各项噪声的平方和近似表示 Allan 方差 [7]

$$\sigma^2(\tau)=\sigma_Q^2(\tau)+\sigma_N^2(\tau)+\sigma_B^2(\tau)+\sigma_K^2(\tau)+\sigma_R^2(\tau) \tag{6}$$

Allan 方差的拟合模型表示为

$$\sigma^2(\tau)=\sum_{i=-2}^2A_n\tau^n \tag{7}$$

为了提高实际拟合精度,一般对 Allan 标准差拟合

$$\sigma(\tau)=\sum_{i=-1}^lA_n\tau^n \tag{8}$$

采用式(8)通过最小二乘对 Allan 标准差拟合,根据拟合求出的 A_n 计算出各项噪声系数如下: $Q=A_{-1}/\sqrt{3},N=60A_{-0.5},B=A_0/0.664,K=60\times3600A_{0.5},R=3600\times3600A_1$ 。

3 数据采集系统搭建

MEMS 惯性测量单元 MPU6050,具有 3 个正交轴向的陀螺仪和 3 个正交放置的加速度计及一个温度计,可以用来测量载体六轴向的角速度和加速度。实验采用 STM32F103RCT6 作为主控制器,通过 I²C 接口读取 MPU6050 数据,STM32F103RCT6 经过串口将数据传至上位机。A302EX 是三轴无线加速度(振动)节点,内置天线,特别适合无线测量。A302EX 数据采集系统由无线传感器节点(种类、数量可任意扩展)、接收网关、BeeData 计算机采集处理软件 3 部分组成。实验利用 A302EX 通过无线接收网关将采集到的数据上传至计算机,并用 BeeData 计算机采集处理软件将采集的数据保存。为避免参考系不同引起 MPU6050 和 A302EX2 传感器性能对比误差,将两个数据采集平台置于相同环境。

4 实验数据采集与处理

测试条件为静态测试, X,Y 轴方向加速度为 0 m/s^2 , Z 轴方向加速度约为 $-g_n$ 。将 MPU6050 和 A302EX 静置于相同位置 1 h 后进行数据采集,采样间隔为 0.257 s,连续采集 2 h 数据。每个轴向共有 28 000 个样本点,每个传感器共有 3 个轴(其中 MPU6050 只读取加速度计数据,其他数据屏蔽读取)。MPU6050 和 A302EX 采集的数据如图 1 所示。

从图 1 可以看出:

1) A302EX 加速度计在三个轴方向的精度均好于 MPU6050; A302EX 在数据输出之前已经过校准处理。

2) A302EX 噪声明显较 MPU6050 大, A302EX 的三轴原始数据曲线带宽明显更宽, 而且存在漂移, 说明 A302EX 在静态惯性和环境条件下运行时其随机振动比较大。

3) MPU6050 的主要问题是零偏误差, 需要进行校正处

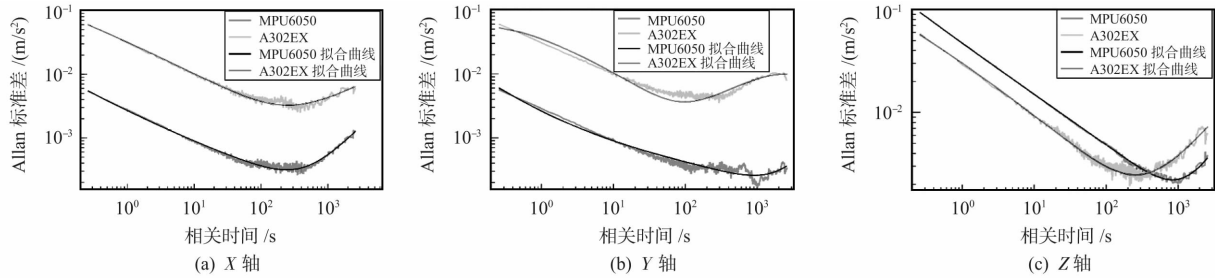


图 2 MPU6050 和 A302EX 三轴加速度 Allan 标准差拟合曲线与原曲线对比

根据各项噪声系数表达式可以得到两传感器噪声系数, 如表 2 所示。

表 2 MPU6050 和 A302EX 噪声系数表

噪声系数	$Q/(m/s)$	$N/(m/s/h^{0.5})$	$B/(m/s^2)$	$K/(m/s/h^{1.5})$	$R/(m/s/h^2)$
MPU6050-X 轴	9.64×10^{-5}	0.1422	2.17×10^{-4}	2.9103	3.4236
MPU6050-Y 轴	3.40×10^{-4}	0.1027	4.85×10^{-4}	3.7592	3.6571
MPU6050-Z 轴	4.78×10^{-4}	2.7277	9.36×10^{-4}	20.0372	34.2491
A302EX-X 轴	1.30×10^{-3}	2.1063	1.77×10^{-3}	53.6328	30.1468
A302EX-Y 轴	6.87×10^{-3}	3.2246	0.0113	44.7097	20.8255
A302EX-Z 轴	1.08×10^{-3}	1.9858	1.95×10^{-3}	31.5780	25.5264

从表 2 中看出, A302EX 和 MPU6050 速度随机游走、速率游走和速率斜坡 3 项噪声系数均很大, 在工程实践中仍然需要进行噪声消除, 比如采用 Kalman 滤波^[11]等, 以提高其测量精度。A302EX 在 X、Y 轴方向的量化误差、速度随机游走和零偏不稳定性、速率游走和速率斜坡 5 项噪声误差系数和 A302EX 在 Z 轴方向的量化误差、零偏不稳定性、速率游走 3 项噪声系数均大于 MPU6050。

6 结 论

简要阐述了 MEMS 加速度计误差源和 Allan 方差方法原理和实现, 在 Allan 方差分析法基础上, 对低成本加速度计 MPU6050 和高成本加速度计 A302EX 进行了实测和分析, 得到了量化误差、速度随机游走和零偏不稳定性、速率游走和速率斜坡 5 项噪声系数。实验结果表明: Allan 方差方法能有效辨识加速度计误差, MPU6050 在精度和价格方面性能更好, A302EX 具有配套的数据采集系统和无线传感网, 在实用方面具有很大优势。

参考文献:

此外, 实测的 MPU6050 数据中, 发现有部分传感器的信号野点^[11]非常大且多。因此, MPU6050 在集成到系统中时, 需要进行大量的信号处理和滤波工作, 以满足系统的需要。

5 两种加速度计的性能分析

将两种传感器实测数据根据 Allan 方差原理绘制 Allan 标准差双对比数曲线, 并根据式 (8) 对两传感器的 Allan 标准差进行拟合, 如图 2 所示。

- [1] 张 霞, 闫社平. 微机械加速度计内部噪声影响的对比分析[J]. 西安邮电大学学报, 2012, 17(2): 57-61.
- [2] 石玺文, 李 杰, 胡陈君, 等. MEMS 三轴加速度计 6 位置标定方法的研究[J]. 电子器件, 2016, 39(2): 403-406.
- [3] 万蔡辛, 付丽萍, 薛 旭, 等. 微机械加速度计发展现状浅析[J]. 导航与控制, 2012, 11(2): 73-77.
- [4] 于丽杰, 高宗余. MEMS 传感器随机误差分析[J]. 传感器与微系统, 2012, 31(3): 63-65.
- [5] 杜红松, 程建华, 唐苗苗. 基于 ARMA 的微惯性传感器随机误差建模方法[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(4): 54-57.
- [6] 赵 忠, 李更新, 林太刚. 基于 NIcompact DAQ 的惯性器件性能评估系统[J]. 自动化技术与应用, 2014, 33(4): 74-78.
- [7] 来凌红. 基于 ARMA 模型和狼群算法的陀螺随机漂移建模研究[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(4): 56-62.
- [8] 宋海宾, 杨 平, 徐立波. MEMS 传感器随机误差分析及处理[J]. 传感技术学报, 2013(12): 1719-1723.
- [9] Li J, Fang J. Sliding average allan variance for inertial sensor stochastic error analysis[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2013, 62(62): 3291-3300.
- [10] Xue L, Jiang C, Wang L, et al. Noise reduction of MEMS gyroscope based on direct modeling for an angular rate signal[J]. Micromachines, 2015, 6(2): 266-280.
- [11] 陈 晨, 赵文宏, 徐慧鑫, 等. 基于卡尔曼滤波的 MEMS 陀螺仪漂移补偿[J]. 机电工程, 2013, 30(3): 311-313.
- [12] 曾凡林, 钟少龙, 徐 静, 等. MEMS 加速度计信号光电检测与电容检测的噪声分析[J]. 传感技术学报, 2008, 21(5): 785-790.
- [13] 徐 哲, 刘云峰, 董景新. MEMS 加速度计温漂预测补偿模型[J]. 中国惯性技术学报, 2012, 20(5): 601-604.
- [14] 闫 新, 刘洁瑜, 宁小磊, 等. 抗野值自适应 Kalman 滤波在 MEMS 加速度计信号处理中的应用[J]. 光电与控制, 2009, 16(11): 71-73.

作者简介:

杜少林 (1994-), 男, 本科, 专业方向为 MEMS 惯性传感器技术、信号处理, E-mail: 1420467324@qq.com。