

## Analysis and Processing on Zero Position Error of MEMS Gyroscope\*

CHEN Xuguang, YANG Ping\*, CHEN Yi

(School of Mechatronics Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** Study on zero position error of MEMS gyroscope has a great value on improving the accuracy of inertial navigation system. Allan variance analysis method was adopted to evaluate on zero position error of MEMS gyroscope. A kind of dynamic zero offset compensation algorithm was presented to eliminate the zero offset error. HDR (Heuristic Drift Reduction) was also improved and the compensation accuracy of original algorithm was increased effectively. Finally, Allan variance analysis method was adopted to evaluate on the compensated zero position error. Test had been done with the platform of gyro-equipped indoor mobile robot Voyager-IIA and the results show precision was increased significantly with the improved algorithm.

**Key words:** MEMS gyroscope; zero position error; HDR; dynamic compensation; Allan variance analysis

EEACC: 7630

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2012.05.015

## MEMS 陀螺仪零位误差分析与处理\*

陈旭光, 杨平\*, 陈意

(电子科技大学机械电子工程学院, 成都 611731)

**摘要:** 研究微机械陀螺仪的零位误差对提高惯性导航精度具有重要意义。采用 Allan 方差分析法对 MEMS 陀螺仪的零位误差做了综合评定, 提出了一种动态的零值偏移误差补偿算法来滤除陀螺仪的零值偏移误差, 还对启发式漂移消减法 HDR (Heuristic Drift Reduction) 做了改进, 有效地提高了原算法的补偿精度。最后, 再次采用 Allan 方差分析法对补偿后的零位误差进行评定, 并以 Voyager-IIA 机器人为平台进行试验, 结果证明了改进后的算法能显著地提高陀螺仪的输出精度。

**关键词:** MEMS 陀螺仪; 零位误差; 启发式漂移消减法; 动态补偿; Allan 方差分析

中图分类号: V241.5

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2012)05-0628-05

微电子机械系统 MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) 陀螺仪以其尺寸小、质量轻、价格低的优点越来越受到人们的重视, 但是精度较低限制了它的应用领域。提高 MEMS 陀螺仪精度主要方法有提高加工工艺的精度和对陀螺仪的误差做精准的补偿两种方法, 前者的周期较长且易于增加成本, 而后者则是一种目前比较可行的方法。MEMS 陀螺仪的误差主要包括零位误差和动态误差, 一般重点对零位误差做处理<sup>[1-2]</sup>。零位误差又分为零值偏移误差和随机漂移误差, 目前对 MEMS 陀螺仪零位误差的估算方法主要包括  $1\sigma$  和 Allan 方差两种方法。 $1\sigma$  方法得到的是误差的总体指标, Allan 方差分析法可以对误差的各种成分进行有效的分析<sup>[3-7]</sup>。目前对零值偏移误差的补偿方法比较简单, 一般采用在静态

条件下测定零值偏移常量, 在应用中通常采用对其一次性的零值偏移补偿的方法。在陀螺仪长时间工作以及外界环境发生变化条件下, 零值偏移量并非恒定值, 所以这种简单的零值偏移误差补偿方法存在很大的缺陷<sup>[8]</sup>。对陀螺仪的随机漂移误差补偿目前常采用 Kalman 滤波的方法, 因这种方法具有较好的实时性得到了广泛的引用, 但是 Kalman 滤波法要求信号必须是平稳时间序列, 且要知道信号的激励噪声和观测噪声的方差<sup>[9-10]</sup>, 在实际应用中这两种方差较难测得。

鉴于此, 本文从工程应用的角度出发, 详细阐述了基于 Allan 方差的陀螺仪的零位误差分析法、动态零值偏移误差的补偿方法以及基于 HDR<sup>[11-12]</sup> 的随机误差补偿法, 旨在对如何对陀螺仪的误差进行

项目来源: 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (E022050205)

收稿日期: 2011-11-28 修改日期: 2011-12-27

分析和处理提供一种新思路和技术参考。

### 1 MEMS 陀螺仪误差分析

Allan 方差分析法是对陀螺仪误差分析中通常所采用的方法,该方法不仅能综合分析陀螺仪的性能,还可以得到陀螺仪的各项静态误差指标。

#### 1.1 Allan 方差分析法的基本原理

假设采样时间间隔为  $T_s$ , 总的采样时间为  $T$ , 那么就可以得到总数据点数为  $N=T/T_s$  的一个数据样本, 接下来就可以按以下步骤来构造 Allan 方差曲线:

(1) 按时间顺序将数据均分为  $K$  个子集, 每个子集的数据点数为  $n$ , 每个数据子集的平均时间为  $\tau(n) = nT_s$ 。

(2) 每个子集的均值可以用下式表示。

$$\bar{\Omega}_k(\tau) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Omega_i^k \quad (1)$$

其中  $\bar{\Omega}_k(\tau)$  表示第  $k$  个子集的均值,  $\Omega_i^k$  表示第  $k$  个子集中的第  $i$  个点。

(3) 每个不同的子集之间的方差即为 Allan 方差可以表示为式(2)。

$$\sigma^2(\tau) = \frac{1}{2} E[(\bar{\Omega}_{k+1}(\tau) - \bar{\Omega}_k(\tau))^2] \quad (2)$$

式中  $\sigma^2(\tau)$  表示平均时间为  $\tau$  时的 Allan 方差,  $E$  表示求均值。

(4) 以平均时间  $\tau$  为自变量, 就可得到 Allan 方差随平均时间  $\tau$  变化的曲线图, 再经对数变换便可到用来做误差分析的 Allan 双曲线图。几种常见的误差对应不同的平均时间, 也就是对应双对数曲线的不同斜率。表 1 列出了常用的 3 种误差系数与 Allan 方差的对应关系, 通过这种对应关系就可以确定 3 种噪声的系数。

表 1 Allan 标准差与常见的误差系数对应的关系

Allan 标准差	系数	斜率
$\sigma(\tau) = \sqrt{3} Q / \tau$	量化噪声 $Q$	-1
$\sigma(\tau) = R / \sqrt{\tau}$	角度/速率随机游走 $R$	-1/2
$\sigma(\tau) = 0.664B$	零值偏移不稳定性 $B$	0

#### 1.2 MEMS 陀螺仪误差分析

对陀螺仪采集数据前, 先让陀螺仪预热一段时间, 保证陀螺仪工作稳定后, 以 100 Hz 的采样频率进行采样, 采样时间为 3 h。得到数据后以 MATLAB 为数据处理平台进行数据处理, 图 1 为计算所得 Allan 方差双曲线图。

将 Allan 方差曲线经多项式拟合后求取相应的

斜率值, 便可得到的各噪声系数如表 2 所示。从表中可以看出量化噪声系数很小, 这说明数据采集系统的精度符合要求; 角度随机游走系数较低表明驱动和检测模态稳定性较好; 但是零值偏移不稳定性系数较大, 这说明零值偏移误差的稳定性较差, 这要求在以后的滤波和补偿中不能简单的一次性补偿零值偏移误差, 本文提出的动态零值偏移补偿算法能很好的解决这一问题。

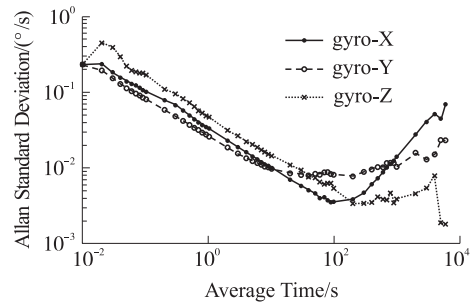


图 1 陀螺仪数据 Allan 方差分析图

表 2 MEMS 陀螺仪噪声系数

参数	X 轴	Y 轴	Z 轴
量化噪声系数 (°)	0.013	0.015	0.018
角度随机游走 (°/√h)	2.60	2.28	4.42
零值偏移不稳定性系数 (°/h)	41.32	68.04	29.08

### 2 零值偏移误差补偿

一般地对零值偏移误差的补偿都比较简单, 通常采用陀螺仪工作稳定后一段静止数据的均值来补偿陀螺仪在整个运行过程中的零值偏移误差, 但是随着陀螺仪的工作时间的增加, 环境温度的变化等因素的影响, 陀螺仪的零值偏移也会产生明显的漂移。

图 2 为经过滤波后的陀螺仪静态漂移信号, 从图中可以看出 2 h 后的零值偏移发生了明显的漂移, 并且有进一步增大的趋势, 在这种情况下, 若只采用固定的均值补偿很难准确的消除零值偏移误差的影响, 这将给导航角的计算带来很大的累积误差。为了能更为准确的去除零值偏移误差, 本文提出了一种动态的补偿方法, 其程序流程如图 3 所示。

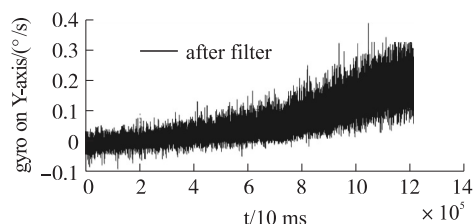


图 2 滤波后静态信号

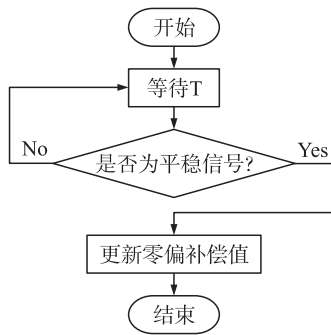


图 3 动态补偿零值偏移流程图

首先算法预先设定零值偏移补偿因子的更新时间  $T$ 。 $T$  的值越大补偿算法的实时性将变的越差, 如果  $T$  值太小计算量就明显增加, 一般选择在 10 min 左右。设定更新时间  $T$  后, 算法就以  $T$  为时间间隔对补偿因子进行更新。载体有角速度输入时, 陀螺仪输出信号为非平稳信号, 当载体为静止或为直线运动情况下陀螺仪信号为平稳信号, 这时对陀螺仪的输入才为零。所以更新补偿因子前算法首先判定当前信号的平稳性, 若当前信号为平稳信号, 便可取当前的一段数据的均值来更新补偿因子, 若当前信号为非平稳信号, 则应跳过此次更新。实际应用中选用分段检验法判定信号的平稳性<sup>[13]</sup>。

### 3 随机漂移误差补偿

假定载体在运动过程中若不是在转弯则是在沿直线运动, 那么理论上陀螺仪的输出应该为零, 若不为零则将之视为随机漂移。HDR 算法就是根据以上理论得到启发, 先判定载体是否沿直线运动, 若是则对陀螺仪的输出进行补偿。

从图 4 可以看出, HDR 算法其实是一个闭环的控制系统, 这也是这种算法和其他的误差处理算法的不同之处。陀螺仪输出信号主要有  $w_{true}$ 、 $\varepsilon_0$  和  $\varepsilon_d$  组成。 $w_{true}$  为真实的输入值, 也是最终要测的量, 为了能测得准确的  $w_{true}$  值, 就必须从测得数据中将  $\varepsilon_0$  和  $\varepsilon_d$  除去。其中零值偏移量  $\varepsilon_0$  的补偿已经在第二部分中讲述。若输入的角度速度为 0, 对  $\varepsilon_0$  进行补偿后陀螺仪的输出仅为随机漂移  $\varepsilon_d$ , 从控制系统的角度理解,  $\varepsilon_d$  为干扰, 如果参数选择合理, 在稳定状态下, 通过比例积分或者仅通过积分环节, 系统可以收敛于 0, 这就意味着控制信号可以无偏跟踪信号  $\varepsilon_d$ 。理想的情况下  $I = -\varepsilon_d$ 。

上述的基本 HDR 算法存在一个问题, 当运载体有微小的转动速率时, 算法将认为是  $\varepsilon_d$ , 这将给计算带来误差。针对这个问题一些学者提出了一些改进的方法, 在实际的应用中也起到了一定的效果。

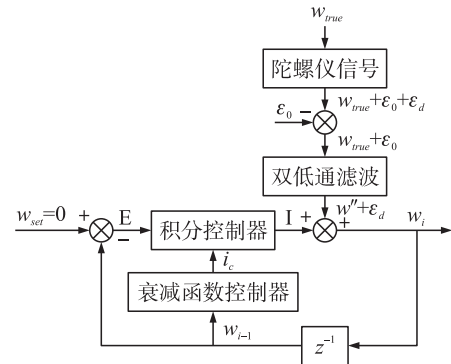


图 4 HDR 算法框图

本文基于 HDR 算法, 对阈值线性函数<sup>[11]</sup>做了修改使得收敛速度明显加快, 而且能较好的识别微小的角度输入, 极大的减小了理论上存在的误差, 有效的提高了算法的准确性。式(3)为改进后的阈值函数。图 5 为改进后的阈值曲线。

$$A_i = \begin{cases} \left(1 - \frac{|w_{i-1}|}{\theta_w}\right)^p & \text{for } |w_{i-1}| \leq \theta_w \\ 0 & \text{for } |w_{i-1}| \geq \theta_w \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中  $A_i$  为要计算的衰减函数,  $\theta_w$  为设定的阈值,  $p$  为设定的衰减因子 ( $p \geq 1$ )。在阈值计算中增加衰减因子也正是本文对原 HDR 算法的改进。当  $p=1$  时就是原来的 HDR 算法,  $p$  的值应该根据具体的 MEMS 传感器的特性进行设定, 因为不同型号的传感器其误差特性是不同的, 特定的  $p$  值能使 HDR 算法对特定的传感器起到最好的补偿效果。

$$I_i = I_{i-1} - A_i \text{Sign}(w_{i-1}) i_c \quad (4)$$

$I$  为补偿因子,  $\text{Sign}$  为取符号函数,  $i_c$  为固定的增量。

$$w_i = w'' + \varepsilon_d + I_i \quad (5)$$

式中  $w''$  为经过双通滤波器滤波后的信号,  $w_i$  就是经过 HDR 算法对零位随机漂移误差进行补偿后的输出信号。

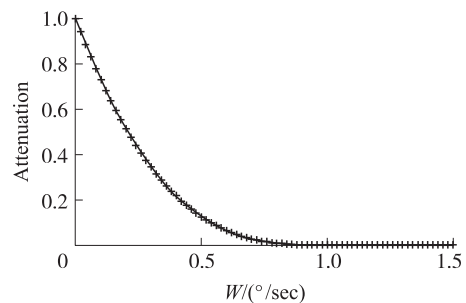


图 5 阈值衰减曲线

在改进后的算法中,  $p$  值的选择很关键, 当  $p$  值选择的越大收敛速度就越快, 但 HDR 的作用范围将减小, 在实际应用中, 只要选择适当的  $p$  和  $\theta_w$  值, 总

能使得输出结果更接近于真实的输入, 得到理想的角速度输出。

### 4 试验验证与分析

为了对算法的精度做验证, 本文采用 Allan 方差分析法对误差补偿后的数据做了评定, 图 6 为经过误差补偿后陀螺仪数据的 Allan 方差分析图, 表 3 为计算所得的噪声系数。

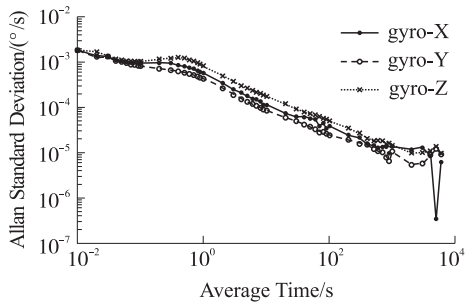


图 6 误差补偿后的 Allan 方差分析图

表 3 误差补偿后 MEMS 陀螺仪噪声系数

参数	X 轴	Y 轴	Z 轴
量化噪声系数 ( $\times 10^{-4} \circ$ )	4.29	1.67	5.05
角度随机游走 ( $\times 10^{-2} \circ / \sqrt{h}$ )	2.167	1.455	2.765
零偏不稳定性系数 ( $\times 10^{-2} \circ / h$ )	2.299	4.215	5.195

将表 3 和表 2 对比可以看出, 经过误差补偿后陀螺仪的噪声系数降低了两个数量级。

除此之外, 本文还以 Voyager-IIA 轮式机器人为平台进行了测试。测试时, 将 Nokia-Sensor-Box (内置有三轴陀螺仪) 固定在机器人上, 先让陀螺仪工作一段时间使其达到稳定状态, 然后让机器人沿着一个边长为 5 m 的正方形轨迹运动两周, 并回到初始状态。以 100 Hz 的采样频率测得陀螺仪数据。图 7 为采集到的陀螺仪 Z 轴原始数据和经过 HDR 算法处理后的数据, 图中有 8 个矩形波, 这分别是机器人在运动轨迹的拐角处输入的八个 90° 的转角。

本文分别用原始数据、经原 HDR 算法处理后的数据和经本文改进后的 HDR 算法处理的数据进行航向角的计算。理论上如果没有误差的存在, 那么计算所得的相对初始位置的航向角度应该为零, 若不为零, 所得结果即为航向误差。3 种数据的计算结果如表 4 所示。

表 4 误差比较

数据类型	原始数据	原 HDR	改进的 HDR
角度误差/(°)	-21.308	2.456	1.121

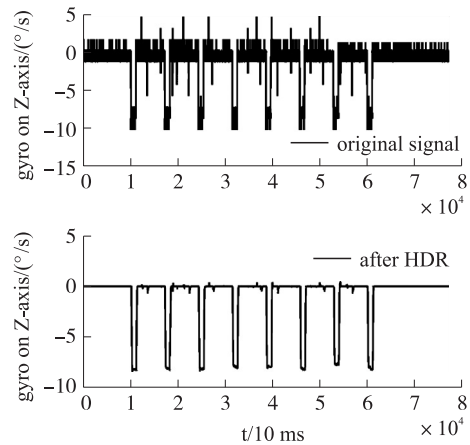


图 7 Z 轴陀螺仪数据

从表 4 中可以看出经本文改进后的 HDR 算法能更为准确的对零位误差进行补偿, 使得补偿后的结果更接近于真实的输入。

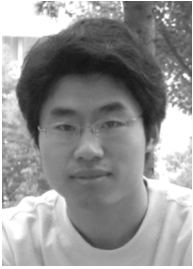
### 5 结论

本文针对陀螺仪的零值偏移误差的不稳定性, 提出了一种动态补偿的方法, 改进了 HDR 算法, 使得该算法对随机漂移误差的补偿更为准确。采用 Allan 方差分析法对补偿前后的数据作了对比分析, 分析结果证明本文提出的补偿算法可以降低陀螺仪噪声系数两个数量级。以 Voyager-IIA 机器人为平台对两种算法做了验证, 结果证明本文提出和改进的算法能更为精确的补偿零位误差。在试验中, 本文改进的 HDR 算法中  $p$  和  $\theta_w$  值都是通过实验的方法得出, 目前还未能找到一种合理的算法计算出最优值, 还有待下一步的研究。

#### 参考文献:

- [1] 潘金燕, 朱长纯, 樊建民, 等. 微机械陀螺仪零位误差的研究 [J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(4): 480-483.
- [2] 施芹, 裘安萍, 苏岩等. 硅微陀螺仪的误差分析 [J]. 传感技术学报, 2006, 19(4): 2182-2185.
- [3] 邹学锋, 卢新艳. 基于 Allan 方差的 MEMS 陀螺仪性能评价方法 [J]. MEMS 器件与技术, 2010, 47(8): 490-494.
- [4] 赵思浩, 卢明泉, 冯振明, 等. MEMS 惯性器件误差系数的 Allan 方差分析方法 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2010, 40: 672-675.
- [5] 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.
- [6] Hou H, El-Sheimy N. Inertial Sensors Errors Modeling using Allan Variance [C] // Proceedings of ION GPS/GNSS 2003. Portland: The US Institute of Navigation, ION, 2003. 2860-2867.
- [7] IEEE Standard Specification Format Guided and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros [S]. IEEE STD 647-2006.

- [8] 蒙涛,王昊,李辉. MEMS 陀螺仪误差建模与滤波方法[J]. 系统工程与电子技术,2009,31(8):1944-1948.
- [9] 李杰,张文栋,刘俊. 基于时间序列分析的 Kalman 滤波方法在 MEMS 陀螺仪随机漂移误差补偿中的应用研究[J]. 传感技术学报,2006,19(5):2216-2219.
- [10] 钱华明,夏全喜,阙兴涛. 基于 Kalman 滤波的 MEMS 陀螺仪滤波算法[J]. 哈尔滨工程大学学报,2010,3(9):1217-1221.
- [11] Borenstein J,ojeda L,Kwanmuang S. Heuristic Reduction of Gyro Drift for Personnel Tracking System [J]. The Journal of Navigation,2009,62(1):41-58.
- [12] 钱华明,夏全喜,安笛,等. 启发式算法在 MEMS 陀螺仪数据处理中的应用[J]. 传感器与微系统,2010,29(3):109-111.
- [13] 杨叔子,吴雅,轩建平,等. 时间序列分析的工程应用(上、下册)[M]. 武汉:华中理工大学出版社,2007.



陈旭光(1986-),男,汉族,河南人,电子科技大学研究生,主要方向为自主移动机器人的惯性导航技术,chenxuguang.555@163.com;



杨平(1963-),男,汉族,四川人,电子科技大学机械电子工程学院教授,硕士研究生导师,主要研究方向为机电系统计算机测控理论与技术、移动机器人控制技术, ping@uestc.edu.cn;



陈意(1986-),男,汉族,四川人,电子科技大学研究生,主要研究方向为惯性传感器的手势识别技术。