

MEMS 陀螺仪静态漂移模型与滤波方法研究

金光明, 张国良, 陈林鹏, 田 琦

(第二炮兵工程学院, 陕西 西安 710025)

摘 要: 针对移动机器人上安装的 MEMS 陀螺仪进行研究, 根据 MEMS 陀螺仪的实测数据, 分析了其噪声特性, 采用时间序列分析方法建立 MEMS 陀螺仪漂移的 AR 模型, 进而通过 Kalman 滤波降低随机噪声对 MEMS 陀螺仪精度的影响。仿真结果表明: 静态漂移的建模和滤波方法对提高 MEMS 陀螺仪精度是有效的。

关键词: MEMS 陀螺仪; AR 模型; 卡尔曼滤波; 辨识; 漂移

中图分类号: U666.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-9787(2007)11-0048-03

Research on filter method and model of MEMS gyro static drift

JIN Guang-ming, ZHANG Guo-liang, CHEN Lin-peng, TIAN Qi

(The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China)

Abstract: The MEMS gyro in robot is researched. The noise feature of MEMS gyro is analyzed. Based on the AR model, the statistic parameters are reckoned. Then, the Kalman filter method is used to denoise the signal of MEMS gyro. The simulation results show that the method of modeling and Kalman filter can achieve good performance on the denoise of MEMS gyro.

Key words: MEMS gyro; AR model; Kalman filter; identification; drift

0 引 言

近年来, 作为惯性技术新兴的重要研究领域, MEMS 陀螺仪以其高性能、小尺寸、低能耗、重量轻、可靠性高等优点, 获得了长足的发展, 在低成本导航系统中获得了越来越广泛的应用^[1]。但是, 受制造工艺和精度水平的限制, 相比传统制造工艺制造的惯性传感器, 其输出数据的随机噪声较大, 因此, 必须建立合理的随机噪声模型, 根据建立的模型进行补偿, 以减小其对系统精度的影响。

针对第二炮兵工程学院自制的‘东风’号移动机器人内部装配的 MEMS 陀螺仪, 采用了一种针对微陀螺仪随机噪声数据的 AR 模型建模方法^[2]和 Kalman 滤波方法^[3]。

1 数据采集与噪声分析

陀螺仪漂移有静态漂移与动态漂移, MEMS 陀螺的零点信号(角速度为零时的陀螺输出信号)能够较好地反映其噪声特性, 故本文采用静态漂移。陀螺噪声信号是连续信号, 而时序建模的对象是离散的时间序列, 这就需要对连续信号进行采样。以 z 轴的陀螺为例, 采样周期为 10 ms。即每 10 ms 采集一次陀螺输出的瞬时数据。进行 20 min 试验。陀螺漂移原始测量部分信号如图 1 所示。

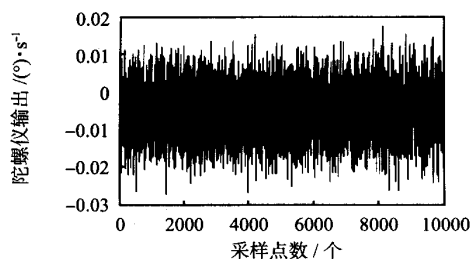


图 1 陀螺漂移原始数据

Fig 1 Raw data of gyro drift

从漂移数据的分析和图 1 可以得知, MEMS 陀螺仪的漂移包含随机分量, 样本序列是一个随机时间序列^[4]。在陀螺仪漂移误差中, 常值漂移对陀螺仪误差产生的贡献最大。对它的处理通常在移动机器人启动还没有工作时, 对采集的陀螺仪的漂移数据进行平均, 然后, 在应用时, 在观测数据中将其减去。其次就是由随机漂移和环境温度所造成的误差, 本文通过软件的方式对随机误差进行滤波和校正。

2 陀螺仪漂移数据的预处理

对陀螺随机漂移信号建立时序模型时, 首先, 应保证该信号为平稳、正态、零均值的时间序列。陀螺的原始信号中

包含常值分量和随机分量。去掉均值(即常值分量)的陀螺漂移信号为陀螺随机漂移,如图 2 所示。

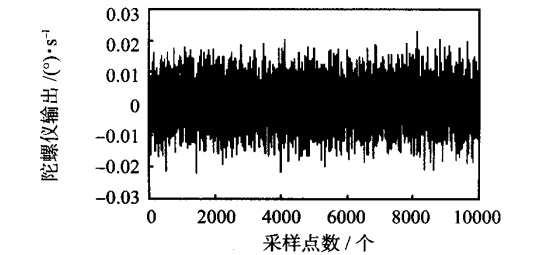


图 2 陀螺仪随机漂移数据

Fig 2 Data of gyro random drift

去掉常值分量后,该信号应为零均值信号;对于一般的测量系统也能够保证正态分布;但因受外部环境和内部因素的干扰,信号的平稳性却很难保证,一般陀螺漂移还存在趋势项。从图中可以看出:陀螺的趋势变化缓慢,在较短的时间内可认为没有变化。从图 2 可看出:陀螺仪的随机漂移是影响陀螺精度的误差源,进而影响整个微惯性测量系统,因此,研究陀螺仪随机漂移对提高系统精度有着重要意义。

3 陀螺漂移模型的辨识

陀螺漂移数据序列,经去掉常值项,所得的漂移数据便成为平稳随机时间序列。现在可以用时间序列分析方法进行建模,构造一个数学模型(AR,MA 或 ARMA 模型)来逼近真实的随机漂移数据,然后,用这一模型对陀螺漂移进行预报,从而达到补偿的目的。本文采用 AR 模型来建立陀螺漂移模型。

3.1 AR 模型

AR 模型是目前在系统分析、预测、辨识、控制中广泛采用的一种随机过程的线性动态模型,陀螺的输出噪声一般可用 AR 模型来描述,AR(*p*)模型的一般表达式为

$$x(k) = \sum_{i=1}^n a_i x(k-i) + \omega(k), \tag{1}$$

式中 a_p 为自回归系数; $x(k)$ 为 AR(*p*)模型的输出; $\omega(k)$ 为噪声序列。

3.2 AIC 准则

AR 模型的定阶方法主要有 3 种:自相关和偏相关函数定阶法;FPE 准则;AIC 和 BIC 准则。其中,AIC 准则应用最广。赤池(Akaike)把最大似然原理推广至对时间序列进行假设检验,提出了一个信息量准则(AIC)。

定义函数为

$$AIC(p) = L \log \hat{\sigma}_\omega^2(p) + 2p, \tag{2}$$

式中 L 为样本大小; $\hat{\sigma}_\omega^2(p)$ 为噪声方差估计值; p 为模型的阶次估计值。

当样本长度 L 固定时,随着模型阶数 p 增高,式中的第
万方数据

一项下降,第二项上升。当 p 达到某数值时,AIC(p)达到最小,此时的 p 为最佳的模型阶数。

3.3 模型的建立

由于陀螺漂移模型的阶次比较低,一般不会超过三阶。这样,可以在模型参数数目等于 3 的范围内查找 AIC 最小的模型作为陀螺漂移的数学模型。针对图 2 去掉常值漂移后的采样陀螺漂移数据,用最小二乘法估计不同模型下的参数,并计算相应的 AIC 值,结果如表 1。

表 1 陀螺随机漂移模型的参数

Tab 1 Parameters of gyro drift model

	一阶自回归模型	二阶自回归模型	三阶自回归模型
一阶自回归系数	0.1559	0.1679	0.1664
二阶自回归系数	0	-0.0769	-0.0781
三阶自回归系数	0	0	-0.0295
AIC 值	-4.2602 × 10 ⁴	-4.2377 × 10 ⁴	-4.2267 × 10 ⁴

从表 1 可以看出:AIC 最小的 AR(1)应作为陀螺漂移的模型。

建立陀螺输出信号的一阶自回归模型 AR(1),其结构模型为

$$x(k) = a_1 x(k-1) + \omega(k), \tag{3}$$

式中 a_1 为自回归系数; $x(k)$ 为 AR(1)模型的输出; $\omega(k)$ 为噪声序列,其方差 σ_ω^2 的估计式为

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_\omega^2 &= \frac{1}{N-1} \sum_{k=2}^N \omega_k^2 \\ &= \frac{1}{N-1} \sum_{k=2}^N (x(k) - a_1 x(k-1))^2. \end{aligned} \tag{4}$$

4 Kalman 滤波的去噪处理

离散 Kalman 滤波是用来处理离散随机信号的一种最优估计方法,是一套计算机实时递推算法,其系统的状态方程如下^[5]

$$X_k = \Phi X_{k-1} + H W_k. \tag{5}$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} a_1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$X_k = \begin{bmatrix} x(k) \\ x(k-1) \end{bmatrix}, W_k = \begin{bmatrix} \omega(k) \\ \omega(k-1) \end{bmatrix}.$$

设 V_k 为测量噪声序列,则系统的输出方程为

$$Z_k = C X_k + V_k, \tag{6}$$

式中 $C = [1, 0]$; X_k 为以 AR 模型辨识误差为特征的白噪声序列作为 AR 模型输入所得到的真值序列; Z_k 为陀螺测量值; V_k 为测量噪声。

噪声序列 $V_k, W_k(k=0,1,2,3,\cdots)$ 的统计特性为

$$E(V_k) = E(W_k) = 0.$$

根据上面给出的系统方程,Kalman 滤波的递推算式为:

状态一步预测阵

$$\hat{\mathbf{X}}_{k/k-1} = \Phi \hat{\mathbf{X}}_{k-1} \quad (7)$$

协方差阵一步预测为

$$\mathbf{P}_{k/k-1} = \Phi \mathbf{P}_{k-1} \Phi^T + \mathbf{H} \mathbf{Q} \mathbf{H}^T \quad (8)$$

滤波增益

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{C}^T (\mathbf{C} \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{C}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (9)$$

状态估计

$$\hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_{k/k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{Z}_k - \mathbf{C} \hat{\mathbf{X}}_{k/k-1}) \quad (10)$$

协方差阵估计

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{C}) \mathbf{P}_{k/k-1} \quad (11)$$

滤波器输出

$$\mathbf{Z}_k = \mathbf{C} \hat{\mathbf{X}}_k \quad (12)$$

将前述零漂数据作为上面 Kalman 滤波器的输入 (\mathbf{Z}_k), 设初始条件 \mathbf{P}_0 为二阶单位阵, \mathbf{x} 为 $[0, 0]^T$, 经过计算得到滤波后的曲线图, 如图 3 所示。

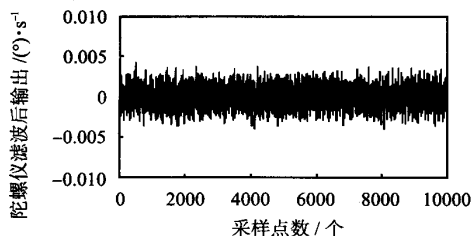


图3 Kalman 滤波数据结果

Fig 3 Data of Kalman filter

(上接第47页)

3 结论

本文提出一种新的分布式高效节能 DEAC 聚类协议, 该协议通过增加能量约束项, 利用节点的剩余能量信息, 改变候选类首的选择概率, 平均网络各节点的能量消耗; 再通过与邻居节点交换信息, 确定候选类首的冗余度, 根据冗余度, 选择合适的类首, 减低网络能耗, 仿真实验结果表明: DEAC 聚类协议比 LEACH, HEED 协议网络能耗更低, 各节点的能耗负担更平均, 网络的生存时间大幅提高。

参考文献:

- [1] Estrin D, Govindan R, Heidemann J, et al. Next century challenges: Scalable coordinate in sensor network [C]// Proceedings of the 5th ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking. Seattle: IEEE Computer Society, 1999: 263-270.
- [2] Hedetniemi S. A survey of gossiping and broadcasting in communication networks [J]. Networks, 1988, 18(4): 319-349.
- [3] Sohrabi K, Cao J, Ailawadhi V, et al. Protocols for self-organization of a wireless sensor network [J]. IEEE Personal Communications, 2000, 7(5): 16-27.
- [4] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks [C]// IEEE Proceedings of the Hawaii International Conference on System

由图 2 和图 3 可知, 经滤波后陀螺随机漂移得到较为明显的抑制。这表明了此算法的有效性和优越性。

5 结论

本文研究了 MEMS 陀螺仪的噪声特性, 基于 AR 模型建立了噪声统计模型。并基于此模型的 Kalman 滤波器能够很好地抑制随机数据中的噪声分量。可以看出: 本文所采用时间序列数学模型建模方法和滤波器设计方法对于低成本导航系统, 尤其是对以 MEMS 陀螺仪作为主要惯性传感器的低成本组合导航系统具有一定的实用价值。

参考文献:

- [1] 李新刚, 袁建平. 微机械陀螺的发展现状 [J]. 力学进展, 2003, 33(3): 289-301.
- [2] 张树京, 齐立新. 时间序列分析简明教程 [M]. 北京: 清华大学出版社; 北方交通大学出版社, 2003: 13-26.
- [3] 付梦印, 邓志红, 张继伟. Kalman 滤波理论及其在导航系统中的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 20-53.
- [4] 李 勇. MATLAB 辅助现代工程数字信号处理 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002: 111-126.
- [5] 赵伟臣, 付梦印, 张启鸿, 等. 微机械 IMU 数据建模与滤波方法研究 [J]. 中国惯性技术学报, 2005, 13(6): 13-17.

作者简介:

金光明 (1984-), 男, 安徽阜阳人, 主要研究方向为全自主足球机器人多传感器信息融合。

Sciences, 2000; 1-10.

- [5] Manjeshwar A, Agrawal D P. TEEN: A routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks [C]// Proceedings of the 15th Parallel and Distributed Processing Symposium. San Francisco: IEEE Computer Society, 2001: 2009-2015.
- [6] Shih E, Cho S, Ickes N, et al. Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks [C]// Proceedings of ACM Mobicom'01. Rome, Italy, 2001: 272-286.
- [7] Jin Zhu. On the energy-efficient organization and the lifetime of multi-hop sensor networks Communications Letters [J]. IEEE, 2003, 7(11): 537-539.
- [8] Younis O, Fahmy S. Distributed clustering in Ad-Hoc sensor networks: A hybrid energy-efficient approach [C]// Proc 13th Joint Conf on IEEE Computer and Communications Societies, 2004: 660-670.
- [9] Tian D, Geroganas N D. A coverage-preserving nod scheduling scheme for large wireless sensor networks [C]// Proc first ACM Int'l Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications. New York: ACM Press, 2002: 32-41.

作者简介:

任代蓉 (1979-), 女, 四川资阳人, 电子科技大学自动化学院, 检测技术与自动化装置专业硕士, 研究方向为无线传感器网络的能量问题。

作者：[金光明](#)，[张国良](#)，[陈林鹏](#)，[田琦](#)，[JIN Guang-ming](#)，[ZHANG Guo-liang](#)，[CHEN Lin-peng](#)，[TIAN Qi](#)
作者单位：[第二炮兵工程学院, 陕西, 西安, 710025](#)
刊名：[传感器与微系统](#)
英文刊名：[TRANSDUCER AND MICROSYSTEM TECHNOLOGIES](#)
年，卷(期)：2007, 26 (11)
被引用次数：6次

参考文献(5条)

1. [赵伟臣;付梦印;张启鸿](#) [微机械IMU数据建模与滤波方法研究](#)[期刊论文]-[中国惯性技术学报](#) 2005 (06)
2. [李勇](#) [MATLAB辅助现代工程数字信号处理](#) 2002
3. [付梦印;邓志红;张继伟](#) [Kalman滤波理论及其在导航系统中的应用](#) 2003
4. [张树京;齐立新](#) [时间序列分析简明教程](#) 2003
5. [李新刚;袁建平](#) [微机械陀螺的发展现状](#)[期刊论文]-[力学进展](#) 2003 (03)

引证文献(6条)

1. [张通. 张骏. 郑梦兴](#) [基于粒子滤波的陀螺随机漂移预测模型研究](#)[期刊论文]-[仪器仪表学报](#) 2010 (5)
2. [高大力. 张骏](#) [基于小波支持向量机的陀螺随机漂移预测模型研究](#)[期刊论文]-[机电一体化](#) 2010 (5)
3. [刘天亮. 高胜利](#) [硅微陀螺仪随机漂移建模及滤波](#)[期刊论文]-[电子测量技术](#) 2010 (9)
4. [田双太. 宋全军. 葛运建](#) [基于惯性测量单元的数字铁饼设计及数据处理算法研究](#)[期刊论文]-[传感技术学报](#) 2010 (10)
5. [葛海江. 张雪娟. 沈海娟](#) [两轴模拟陀螺仪的空中鼠标指针控制方法研究](#)[期刊论文]-[电子技术应用](#) 2010 (11)
6. [葛海江. 陶姗](#) [姿态感知鼠标指针的控制方法](#)[期刊论文]-[机电工程](#) 2009 (3)

本文链接：http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_cgqjs200711016.aspx