

自适应卡尔曼滤波在磁干扰姿态测量中的应用

刘宇, 吕玲, 路永乐, 向高林

(重庆邮电大学 光电信息感测与传输技术重庆市重点实验室, 重庆 400065)

摘要:针对姿态测量系统陀螺仪漂移、周围局部磁场干扰制约姿态测量精度的问题,提出一种基于四元数的自适应卡尔曼滤波(q-AKF)的方法。该方法利用陀螺输出建立姿态解算误差角的状态方程,以磁强计输出构造自适应测量噪声协方差矩阵。仿真结果表明,相比无损卡尔曼滤波(UKF)算法和扩展卡尔曼滤波(EKF)算法,采用q-AKF算法补偿得到的姿态角误差不大于 0.5° 。q-AKF算法对磁强计进行补偿,能够有效抑制陀螺的漂移误差,提高磁干扰环境下姿态解算精度,具有较高的工程应用价值。

关键词:四元数;自适应卡尔曼滤波;磁强计;姿态测量;抗磁干扰

中图分类号:TP212 **文献标识码:**A

The Application of Adaptive Kalman Filter to the Orientation Estimation of Magnetic Interference

LIU Yu, LYU Ling, LU Yongle, XIANG Gaolin

(Chongqing Municipal Level Key Lab. of Photoelectronic Information Sensing and Transmitting Technology, Chongqing University of Post and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Aiming at the problem that the accuracy of the orientation estimation is affected by the gyroscope bias error in the orientation estimation system and the interference from surrounding local magnetic disturbances, a quaternion-based adaptive Kalman filter (q-AKF) algorithm is proposed in this paper. The algorithm utilizes the gyroscope outputs to establish the state equation of attitude error angle and construct the adaptive measurement noise covariance matrix with the outputs of the magnetometer. The simulation results show that the attitude error angle obtained by the q-AKF is less than 0.5° compared with the UKF algorithm and the EKF algorithm. Using the q-AKF algorithm to compensate the magnetometer can effectively suppress the gyro bias error, improve the precision of attitude algorithm in magnetic interference environment, which has high engineering application value.

Key words: quaternion; adaptive Kalman filtering; magnetometer; orientation estimation; anti-magnetic interference

0 引言

姿态测量的应用范围广泛,如检测随机的行走动作^[1]、行人定位^[2]、室内导航^[3]、人体跟踪^[4]。3轴微机电系统(MEMS)加速度计、3轴MEMS陀螺仪和3轴MEMS磁强计可分别用来测量姿态,但载体自身的线性加速度会干扰MEMS加速度计的输出值,使得利用MEMS加速度计计算的载体横滚角、俯仰角会出现很大误差^[5];磁强计使用环境中能产生磁场的物质都会严重干扰磁强计的测量值,并且这种干扰是随机和无法预知的^[6],故3轴MEMS

磁强计无法单独测量出载体的姿态^[7]。

国内外学者对以上问题提出了不同的解决方法。Lizarraga M等采用四元数互补滤波器将陀螺仪、加速度计和磁强计应用于姿态测量,实现三自由度的姿态测量^[8]。Rehbinder H等基于陀螺仪和加速度计提出了一个姿态测量算法,但因缺少磁强计信息,航向角累积误差无法消除^[9]。Harms H和Bachmann E采用基于四元数的卡尔曼滤波器,进一步提高MEMS传感器姿态测量精度^[10]。

文中针对上述问题提出一种基于四元数的自适

收稿日期:2016-03-07

基金项目:国家自然科学基金项目资助(51175535);MEMS振动传感与微姿态组合测井技术国际联合研究中心科技平台与基地建设基金资助项目(cstc2014gjhz0038)

作者简介:刘宇(1972-),男,重庆人,教授,博士,主要从事惯性导航技术的研究。E-mail:liuyu@cqupt.edu.cn。

应 Kalman 滤波器 (q-AKF), 依据微机械陀螺的输出建立误差角状态方程, 自适应 Kalman 滤波器的观测值利用 MEMS 磁强计的测量值计算, 使用自适应卡尔曼滤波 (AKF) 法补偿 MEMS 磁强计的测量值。这种灵活性较强的方法能有效抑制陀螺漂移, 降低磁干扰的影响, 具有较高的精度; 同时, 基于惯性测量单位 (IMU) 对本文提出的算法进行了实验评估。

1 基于四元数的姿态测量分析

四元数利用 4 个元素构成的四维向量定义在三维空间中载体固连坐标系的姿态方向。三维直角坐标系 $O_c x_n y_n z_n$ 围绕向量 n_r 旋转 θ 角度可得三维直角坐标系 $O x_b y_b z_b$, 图 1 为旋转过程。

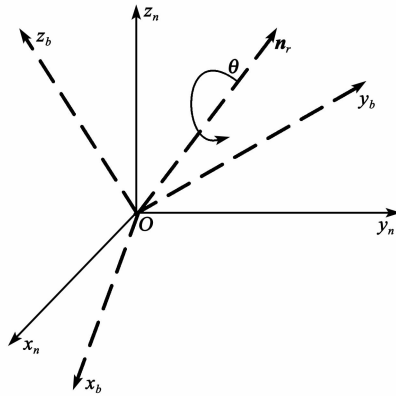


图 1 坐标系旋转向量图

四元数的微分方程为

$$\begin{cases} q(t_0) = q_0 \\ \frac{d}{dt}q = \frac{1}{2}q \otimes \bar{\omega} \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\bar{\omega}$ 为载体坐标系角速度 ω 的四元数。

式(1)成立的先决条件为: 已知 3 轴陀螺仪的角速度和初始姿态。

2 传感器模型

一般用于姿态测量的 MEMS 传感器包括 3 轴加速度计、3 轴陀螺仪、3 轴磁强计^[11]。综合考虑影响 MEMS 传感器测量精度的因素, 建立传感器模型:

$$\begin{cases} \nabla_a = C(q)\mathbf{G} + \mathbf{a}_p + \xi_a \\ \nabla_g = \omega + \xi_g \\ \nabla_m = C(q)\mathbf{m} + \xi_m \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{a}_p \in R^{3 \times 3}$ 为载体的外部加速度矢量; $\mathbf{G} = [0 \ 0 \ g]^T$ 为重力矢量 ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$); $\mathbf{m} = [m_x \ m_y \ m_z]^T = [\|m\| \cos \theta \ 0 \ \|m\| \sin \theta]^T$ 为地球的磁场矢量。假定传感器的输出误差 $\xi_a, \xi_g,$

ξ_m 为零均值高斯白噪声, 与协方差矩阵互不相关。

3 基于四元数的自适应卡尔曼滤波器设计

q-AKF 姿态测量算法的结构流程图如图 2 所示。状态方程利用校准后的陀螺输出值解算, 观测方程利用校准处理后的加速度计、磁强计输出值解算。当检测到载体的姿态时, 滤波器需要利用陀螺和磁强计的输出自适应构造协方差矩阵 \mathbf{R}_k , 以获得最优增益矩阵 \mathbf{K} 。

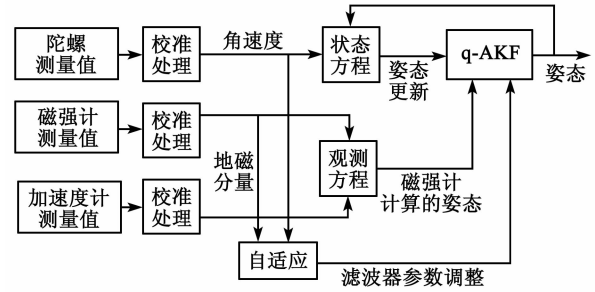


图 2 q-AKF 姿态测量算法结构

3.1 状态方程

离散区间内的姿态变化方程:

$$q_k = \mathbf{A}_k q_k + \boldsymbol{\omega}_k \quad (3)$$

$$\mathbf{A}_k = \exp \left[\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -\nabla_{g,k}^T \\ \nabla_{g,k} & -\nabla_{g,k}^* \end{bmatrix} \Delta t \right] \quad (4)$$

式中: q_k 为姿态四元数; \mathbf{A}_k 为与角速度矢量 $\nabla_{g,k}$ 相关的矩阵; Δt 为采样间隔; $\boldsymbol{\omega}_k \sim N(0, \mathbf{Q}_k)$ 为过程噪声矢量。

$$\boldsymbol{\omega}_k = -\frac{\Delta t}{2} \boldsymbol{\Gamma}_k \xi_{g,k} \quad (5)$$

其中

$$\boldsymbol{\Gamma}_k = \begin{bmatrix} -q_k^T \\ \mathbf{q}_k^* + q_{0,k} I_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (6)$$

为了方便计算, 修改式(3)为

$$q_{k+1} = \gamma_k \mathbf{A}_k q_k + (1 - \gamma_k) \mathbf{A}_k^{\text{last}} q_k + \gamma_k \boldsymbol{\omega}_k + (1 - \gamma_k) \bar{\boldsymbol{\omega}}_k \quad (7)$$

式中: γ_k 可取两个值, 即在陀螺仪测量值可用时 $\gamma_k = 1$, 否则 $\gamma_k = 0$; $\mathbf{A}_k^{\text{last}}$ 包括陀螺仪断电前的最后一个角速度测量值 $\nabla_{g,k}$; $\bar{\boldsymbol{\omega}}_k \sim N(0, \hat{\mathbf{Q}}_k)$ 为当角速度测量值为 0 时的过程噪声。 $\hat{\mathbf{Q}}_k$ 定义如下:

$$\hat{\mathbf{Q}}_k = \mathbf{Q}_k^{\text{last}} \exp(\partial k \Delta t) \quad (8)$$

式中 ∂ 为根据实际情况调整的常量。

3.2 观测方程

在离散区间内, 加速度计、磁力计的输出 (∇_a^T 与 ∇_m^T) 与旋转四元数 q_k 的关系:

$$\Lambda_{a,k} = q_k^{-1} \otimes \bar{G} \otimes q_k \quad (9)$$

$$\Lambda_{m,k} = q_k^{-1} \otimes \bar{m} \otimes q_k \quad (10)$$

式中 $q_k^{-1} = [q_{0,k} \quad -q_{1,k} \quad -q_{2,k} \quad -q_{3,k}]$ 为互补四元数。依据式(9)、(10)推导出四元数观测方程：

$$H_k q_k + \eta_k = 0 \quad (11)$$

式(11)中,利用 MEMS 加速度计和 MEMS 磁强计的测量值计算 H_k 。在载体不运动的状态下,载体的横滚角、俯仰角可通过 MEMS 加速度计测量值准确地计算出,但当载体处于动态时,利用 MEMS 加速度计的测量输出值计算载体横滚角、俯仰角会受到载体自身产生的线性加速度的干扰,产生较大的载体姿态误差角,故动态的情况下,文中主要选用 MEMS 磁强计来辅助测量载体的姿态角,即协方差矩阵 R_k 由 MEMS 磁强计的输出值构造。此时,式(11)中的 H_k 和 η_k 可表示为

$$H_k = \begin{pmatrix} 0 & -(\nabla_{m,k} - m)^T \\ (\nabla_{m,k} - m) & -(\nabla_{m,k} + m)^* \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$\eta_k = \omega_{mg,k}^q = -\frac{1}{2} \Gamma(q_k) (m_k + \xi_{m,k}) \quad (13)$$

式中 $\omega_{mg,k}^q \sim N(r_k, R_{mg,k})$ 为与磁强计相关的未知噪声, r_k 和 $R_{mg,k}$ 的值由滤波器自适应估计得到。

3.3 滤波器的设计

结合第 2.1 和 2.2 节提出的状态方程和观测方程,四元数自适应卡尔曼滤波器设计流程图如图 3 所示。

$$\hat{r}_k = \sqrt{k_1 (\|m_k\| - \|m_0\|) + k_2 \text{var}(\|m_{k-N}\| : \|m_{k+N}\|)} \quad (14)$$

4 实验验证与分析

MEMS-IMU 为实验室自主研制的基于 MEMS 传感器的姿态仪,它集成 3 轴加速度计、3 轴陀螺仪、3 轴磁强计和一个气压计,如图 4 所示。陀螺仪的灵敏度为 $\pm 2\,000$ dps,加速度计的为 ± 8 g,磁强计的为 $\pm 2.5 \times 10^{-4}$ T。采样速率为 100 Hz。MEMS-IMU 与 PC 机是利用 RS232 接口进行有线



图 4 自制姿态仪

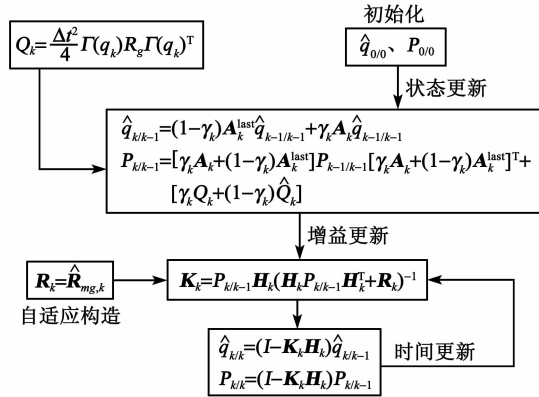


图 3 四元数自适应卡尔曼滤波器设计过程

图 3 中,利用自适应的方法^[12]获得的估计协方差矩阵 $\hat{R}_{mg,k}$ 来补偿磁强计。式(13)给中的 m_k 是未知的。航向角的大小很大程度上受到磁强计的测量值的影响,然而磁强计测量时易受到磁场干扰而产生测量误差。根据具体情况可将磁干扰分为两种情况：

- 1) 实时环境中磁源的随机干扰。
- 2) 磁强计的载体引起的磁干扰。

第 1) 种情况的干扰导致磁强计有较大输出偏差量,同时这类干扰是随机的,很难预先消除;第 2) 种情况的干扰一般可以提前通过补偿方法来修正。

针对第 1) 类干扰,本文利用磁强计的输出采用自适应法来更新协方差 $r_k = -H_{2,k} \hat{q}_{k/k-1}$,之后利用 r_k 来估计协方差矩阵 $\hat{R}_{mg,k}$ 。

通信,软件部分采用 Matlab2014 设计滤波器及进行数据处理。

文中用 3 种方式采集了 3 组数据：

- 1) 在转台上固定好 IMU,启动转台,设置参数保持 IMU 围绕 z 轴进行匀速转动,采用 PC 机保存数据。
- 2) 将 IMU 固定在转台上,保持 IMU 静止,同时在 IMU 上放置 1 个手机作为磁干扰源,启动 IMU 并保存数据。
- 3) 在方式 2) 的基础上,设置转台参数保持 IMU 进行有规律转动,保存 IMU 运动数据。

对第 1 组数据采用不同算法处理,可验证陀螺单独解算姿态角的效果;利用 q-AKF 算法处理第 2 组数据,验证算法消除局部磁场的干扰效果;第 3 组数据采用 3 种不同算法进行处理,比较 q-AKF 算法的性能。文中姿态解算步长 0.005 ms,滤波器步长

0.01 ms, 仿真时间 90 s, 仿真曲线图如图 5~8 所示。

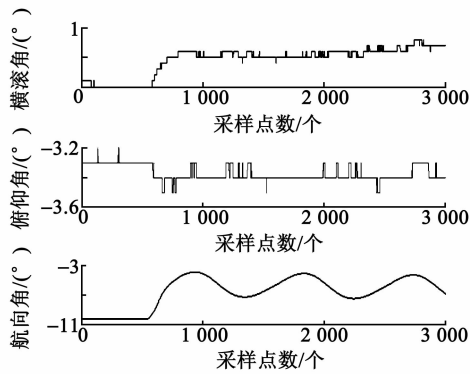


图 5 陀螺输出解算的姿态角

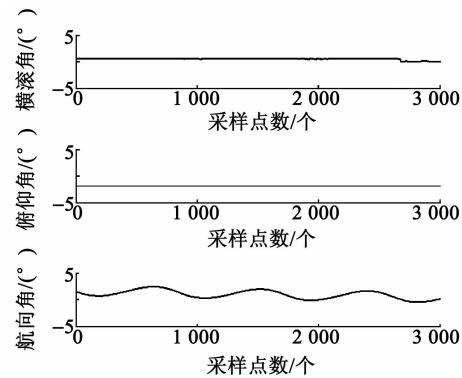


图 6 陀螺+磁强计组合+滤波算法解算的姿态角

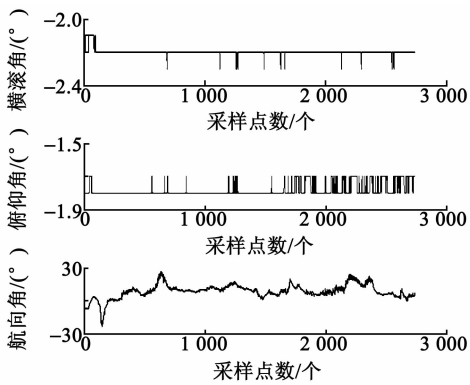


图 7 加磁干扰、陀螺+磁强计组合解算姿态角

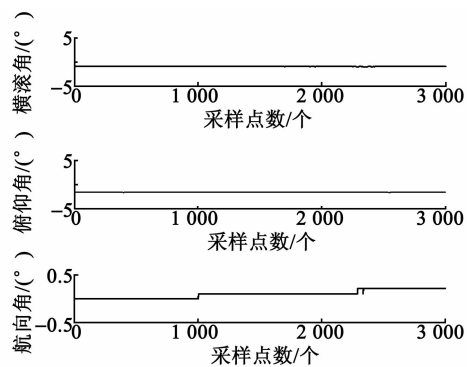


图 8 加磁干扰、陀螺+磁强计组合+滤波算法解算的姿态角

图 5 是基于第 1) 种方式采集的数据, 利用陀螺仪的输出解算的姿态角的仿真曲线。由图可看出, 随着时间的增长, 陀螺单独结算的姿态误差迅速累积, 误差角无收敛趋势且存在较大震荡。

图 6 是基于第 1) 种方式采集的数据, 采用基于四元数的自适应卡尔曼滤波算法解算的姿态角的仿真曲线。由图可看出, 姿态角的误差量未出现明显的增大趋势, 滤波收敛度良好。

图 7 是基于第 2) 种方式采集的数据, 未采用基于四元数的 AKF 算的姿态角的仿真曲线。由图可见, 由于局部磁干扰严重影响磁强计的测量值, IMU 静止时刻输出的姿态角出现大的无规律波动。

图 8 是采用四元数 AKF 处理第 2) 种方式采集的数据而得到的姿态角的仿真曲线。由图可见, 航向角在 0 附近未发生大的波动。

利用文献[13]提出的 EKF 算法、文献[14]提出的 UKF 算法处理实验采集的第 3 组数据, 分别得出两组横滚角、俯仰角和航向角; 再利用 q-AKF 算法处理实验采集的第 3 组数据, 得到一组横滚角、俯仰角和航向角; 计算出 3 组横滚角、俯仰角和航向角的均方根误差(RMSE)如表 1 所示。对 3 组数据进行比较, 发现本文提出的姿态测量算法性能更佳, 但由于磁强计易被周围环境磁干扰影响, 航向角的误差相对较大。

表 1 姿态角均方根误差

算法	横滚角/(°)	俯仰角/(°)	航向角/(°)
EKF	1.35	1.40	2.06
UKF	1.20	0.93	1.28
q-AKF	0.46	0.32	0.48

5 结束语

本文结合四元数和自适应卡尔曼滤波器提出 q-AKF 算法。算法以陀螺的测量值建立姿态解算误差角的状态方程^[15], 利用磁强计测量值建立载体姿态角误差观测方程, 自适应地调整姿态误差角的大小, 且该算法还达到了抑制滤波器发散的效果。此外, 本文提出的算法提高了对磁强计的补偿, 有效抑制陀螺随机漂移带来的误差, 在磁干扰环境下有效地提高了载体姿态测量精度。该 q-AKF 算法的主要优点是不需要提前设定阈值或建立误差模型, 以磁强计协方差矩阵自适应地调整滤波器的最优增益。

参考文献:

- [1] LEE J K, PARK E J. Quasi real-time gait event detection using shank-attached gyroscopes [J]. *Med Biol Engineering and Computing*, 2011, 49(6):707-712.
- [2] QIAN J, PEI L, ZOU D, et al. Optical flow-based gait modeling algorithm for pedestrian navigation using smartphone sensors [J]. *Sensors Journal, IEEE*, 2015, 15(12):6797-6804.
- [3] RENAUDIN V, COMBETTES C. Magnetic, acceleration fields and gyroscope quaternion (MAGYQ)-based attitude estimation with smartphone sensors for indoor pedestrian navigation [J]. *Sensors*, 2014, 14(12):22864-22890.
- [4] TIAN Y, WEI H, TAN J. An adaptive-gain complementary filter for real-time human motion tracking with marg sensors in free-living environments [J]. *Neural Systems and Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on*, 2013, 21(2):254-264.
- [5] SUH Y S. Orientation estimation using a quaternion-based indirect Kalman filter with adaptive estimation of external acceleration [J]. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, 2010, 59(12):3296-3305.
- [6] BIRD J, ARDEN D. Indoor navigation with foot-mounted strapdown inertial navigation and magnetic sensors [emerging opportunities for localization and tracking] [J]. *Wireless Communications, IEEE*, 2011, 18(2):28-35.
- [7] FOURATI H, MANAMANNI N, AFILAL L, et al. A nonlinear filtering approach for the attitude and dynamic body acceleration estimation based on inertial and magnetic sensors: Bio-logging application [J]. *Sensors Journal, IEEE*, 2011, 11(1):233-244.
- [8] YUN X, LIZARRAGA M, BACHMANN E R, et al. An improved quaternion-based Kalman filter for real-time tracking of rigid body orientation [C]//Las Vegas, USA: Intelligent Robots and Systems, 2003 (IROS 2003) Proceedings, 2003 IEEE/RSJ International Conference on IEEE, 2003, 2:1074-1079.
- [9] REHBINDER H, HU X. Drift-free attitude estimation for accelerated rigid bodies [J]. *Automatica*, 2004, 40(4):653-659.
- [10] HARMS H, AMFT O, WINKLER R, et al. Ethos: Miniature orientation sensor for wearable human motion analysis [C]//Waikoloa, Hawaii: Sensors, 2010 IEEE. *IEEE*, 2010:1037-1042.
- [11] ZHAO L, GUAN D, JR L R, et al. An accurate and fault-tolerant target positioning system for buildings using laser rangefinders and low-cost MEMS-based MARG sensors [J]. *Sensors*, 2015, 15(10):27060-27086.
- [12] VALENTI R G, DRYANOVSKI I, XIAO J. Keeping a good attitude: A quaternion-based orientation filter for IMUs and MARGs [J]. *Sensors*, 2015, 15(8):19302-19330.
- [13] REN H, KAZANZIDES P. Investigation of attitude tracking using an integrated inertial and magnetic navigation system for hand-held surgical instruments [J]. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, 2012, 17(2):210-217.
- [14] ZHENG J, NING F. Application of improved adaptive UKF algorithm on aircraft attitude estimation system [J]. *Measurement*, 2015, 2(1):976-979.
- [15] 商高高, 朱晨阳. 基于双重卡尔曼滤波器电池荷电状态的估计 [J]. *重庆理工大学学报(自然科学版)*, 2014(6):1-7.
- SHANG Gaogao, ZHU Chenyang. States of charge estimation of battery based on the dual Kalman filter [J]. *Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science)*, 2014(6):1-7.